

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Systémy ABS pro elektromobily

ABS Systems for Electric Vehicles

Student: Bc. Vojtěch Roh

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

Datum odevzdání: 21. 5. 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Roh**
Studijní program: N3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906T007 Automobilová elektronika
Téma: **Systémy ABS pro elektromobily**
ABS Systems for Electric Vehicles

Zásady pro vypracování:

1. Popište funkci systému ABS u vozidel se spalovacími motory.
2. Navrhněte možnosti řešení systému ABS u vozidel s elektrickým pohonem.
3. Vybrané řešení analyzujte.
4. Pro vybrané řešení vytvořte model soustavy a návrh způsobu řízení elektrického pohonu.

Seznam doporučené odborné literatury:

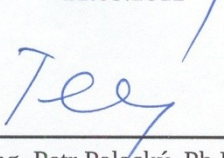
- [1] Ehsani, Mehrdad, a další. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Illinois : CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3154-4.
- [2] Wenzhong, David, Mi, Chris a Emadi, Ali.: Modeling and Simulation of Electric nad Hybrid Vehicles. Michigan : University of Michigan Library, 2007, Sv. 95. ISSN 0018-9219.
- [3] Vlk, František. Podvozky motorových vozidel. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [4] Vlk, František. Dynamika motorových vozidel. Brno : Prof. Ing. františek Vlk, DrSc., 2003. ISBN 80-239-0024-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

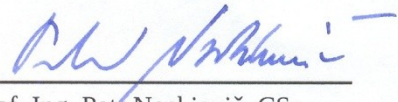
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.
prorektor pro studium

„Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.“

Ostrava, 21. 5. 2012

Bc. Vojtěch Roh

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Ostrava, 21. 5. 2012

Bc. Vojtěch Roh

Anotace

ROH, Vojtěch. *Systémy ABS pro elektromobily*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB - TUO. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou protiblokovacích systémů ABS v elektromobilech. Obsahuje popis funkce a konstrukčních řešení těchto systémů u vozidel se spalovacími motory. Zabývá se popisem základních fyzikálních principů, na kterých spočívá funkce ABS. Popisuje princip brzdění elektromobilů. Hlavní částí této bakalářské práce je návrh a popis konkrétního řešení systému ABS pro elektromobil a vytvoření matematického modelu této soustavy. V závěru práce jsou prezentovány výsledky simulací.

Klíčová slova

Protiblokovací systém, skluz, povrch vozovky, součinitel tření, třecí síla, rekuperační brzdění, zpomalení, moment setrvačnosti, mechanické brzdy, elektromagnetický ventil, regulační cyklus, brzdový tlak, elektromotor, elektromobil, řídicí napětí.

Annotation

ROH, Vojtěch. *ABS Systems for Electric Vehicles*. Ostrava, 2012. 53 pages. Diploma thesis. VŠB - TUO. Supervisor prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.

This thesis is focused on issues of antilock braking systems ABS in electric vehicles. It contains the description of functional and constructional solutions of these systems for vehicles with internal combustion engines. It deals with basic physical principles on which ABS system is based and it also describes braking principles of electric vehicles. The main part of this thesis is design and description of the specific solution of ABS system for electric vehicle and creation of mathematical model for the entire system. Results of the simulations are overallly presented in the conclusion part.

Key words

Antilock system, skid, road surface, friction coefficient, friction force, regenerative braking, deceleration, moment of inertia, mechanical brakes, solenoid valve, control cycle, brake pressure, electric motor, electric vehicle, control voltage.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých symbolů	7
Seznam použitých zkratk	9
Úvod	10
1 Brzdění vozu	11
1.1 Brzdná dráha	11
1.2 Dráha k zastavení vozidla	12
1.3 Skluz a součinitel adheze brzděného kola	13
1.4 Protiblokovací systém ABS	16
1.5 Princip činnosti ABS	17
1.6 Regulační veličiny	20
1.7 Regulační cyklus	22
1.8 Regulace stáčivého momentu (systém GMA)	23
1.9 Varianty ABS systémů	24
1.10 Modelové řady ABS	25
1.11 Hydraulický posilovač brzd	28
2 Možnosti rekuperačního brzdění elektromobilu	29
2.1 Energie spotřebovaná brzděním v městském provozu	30
2.2 Nejčastější rychlosti brzdění	31
2.3 Nejčastěji využívaný brzdový výkon	31
2.4 Brzdná zpomalení v typickém městském provozu	33
2.5 Rozdělení brzdící síly mezi nápravami	33
2.6 Součinnost mechanických brzd a rekuperačního brzdění	34
2.7 Spolupráce brzd v případě mezních stavů	34
3 Podrobná analýza možného řešení	36
3.1 Koncepce elektromobilu	36
3.2 Princip brzdění elektromobilu	37
3.3 Řešení funkce ABS	39
4 Model soustavy	41
4.1 Blok dynamiky vozu	41
4.2 Blok setrvačnosti motoru a kola	46
4.3 Blok stejnosměrného elektromotoru	47
4.4 Blok řízení momentu elektromotoru	49
4.5 Blok algoritmus ABS	52
4.6 Blok mechanických brzd	53
4.7 Celkové blokové simulační schéma	54
5 Výsledky simulací	55
5.1 Parametry modelu	55
5.2 Brzdění na mokrému asfaltu s přechodem na sníh v čase 3s	56
5.3 Brzdění na sněhu	62
Závěr	65
Literatura	67

Seznam použitých symbolů

v	[m/s]	rychlost vozu
v_{ref}	[m/s]	referenční rychlost
u	[m/s]	obvodová rychlosti kola
s	[m]	dráha
B	[N]	brzdná síla
\ddot{x}	[ms ⁻²]	zrychlení, zpoždění, zpomalení
t_r	[s]	reakční doba řidiče
t_p	[s]	doba prodlevy brzdového systému
t_n	[s]	doba náběhu brzd
t_u	[s]	doba maximální účinnosti brzd
μ	[-]	součinitel přilnavosti
μ_B	[-]	součinitel přilnavosti pro brzdnou sílu
μ_s	[-]	součinitel přilnavosti pro boční sílu
λ	[-]	skluz
F	[N]	síla
F_x	[N]	brzdící síla působící na ploše styku
F_g	[N]	tíhová síla kola
α	[°]	směrová úchylka kol
$-a$	[m/s ² -]	zrychlení při maximální přilnavosti kola
$+a$	[m/s ² -]	zrychlení při minimální přilnavosti kola
P_B	[Pa]	brzdný tlak
λ_1	[-]	prahová hodnota skluzu
m	[kg]	hmotnost vozu
m_k	[kg]	hmotnost vozu připadající na jedno kolo
a	[m/s ²]	zrychlení vozidla
f	[-]	odpor valení pneumatiky
O_f	[N]	Odpor válivý
O_v	[N]	Odpor vzdušný
O_z	[N]	odpor proti zrychlení vozidla

c_x	[-]	součinitel vzdušného odporu
S_x	[m ²]	průmět čelní plochy vozu
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost vzduchu
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti rotačních částí
ε	[rad.s ⁻²]	úhlové zrychlení
r	[m]	poloměr kola
M	[Nm]	moment
$i_a(t)$	[A]	proud kotvy motoru
$u_a(t)$	[V]	napětí kotvy (svorkové napětí) motoru
$u_i(t)$	[V]	indukované napětí na kotvě motoru
ϕ	[Wb]	magnetický tok
c	[-]	konstrukční konstanta motoru
R_m	[Ω]	celkový odpor všech vinutí v obvodu kotvy motoru
L_m	[H]	celková indukčnost všech vinutí v obvodu kotvy motoru
Δu_a	[V]	celkový úbytek napětí na obvodu kotvy
M_M	[Nm]	moment motoru
M_Z	[Nm]	moment zátěže
K	[-]	zesílení soustavy
T_1	[s]	časová konstanta
$G_S(s)$	[-]	spojitý přenos soustavy
s	[s ⁻¹]	komplexní proměnná
k_p	[-]	zesílení regulátoru
T_I	[s]	integrační časová konstanta regulátoru
G_R	[-]	přenos regulátoru
T_w	[s]	požadovaná doba náběhu systému
$k_{p\max}$	[-]	maximální hodnota zesílení regulátoru

Seznam použitých zkratek

ABS	protiblokovací systém
ASR	protiprokluzový systém
ESP	elektronický stabilizační program
TCS	protiprokluzová regulace
GMA	regulace stáčivého momentu

Úvod

Moderní motorová vozidla jsou díky dostupnosti pokročilých technologií řídicí elektroniky vybavena čím dál tím větším množstvím bezpečnostních systémů. Mezi další trendy současnosti patří také dlouhodobé zdražování ropy a stále vyšší nároky na hospodárnost a šetrnost automobilu vůči životnímu prostředí. Díky tomu se stále více prosazují alternativní pohony automobilů a mezi nimi hlavně elektromobily a hybridní pohony.

Protiblokovací systém ABS je velmi užitečným bezpečnostním prvkem, který zamezí úplnému zablokování kol při brzdění a tím předejde ztrátě ovladatelnosti automobilu. ABS se v dnešní době stává již uzákoněným standardem a je osazován i v nejnižších řadách současných automobilů. Proto by ani při návrhu a vývoji elektromobilu neměl být v žádném případě tento systém opomenut.

1 Brzdění vozu

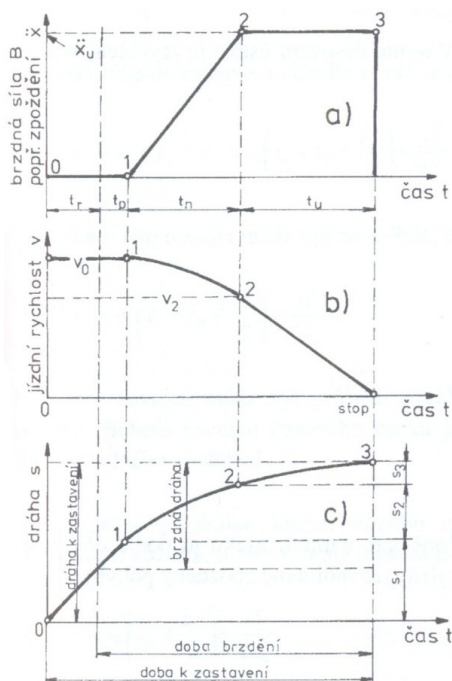
Brzděním se rozumí záměrné snižování rychlosti vozidla nebo také zamezení rozjetí stojícího vozidla. V této úvodní části práce jsou popsány fyzikální vztahy při brzdění např. délka brzdné dráhy a velikosti brzdných sil na nápravách vozidla.

Provozní brzdění musí umožňovat ovládání pohybu automobilu a jeho účinné a rychlé zastavení při všech možných zatíženích a rychlostech a na všech svazích, které přicházejí v úvahu při provozu vozidla. Brzdícího účinku se nejčastěji dosahuje zpomalováním otáčejících se kol, tzn. Že na vozidlová kola je přiváděn brzdný moment, který vyvolá mezi koly a vozovkou vodorovné reakce směřující proti směru jízdy. [1]

1.1 Brzdná dráha

Délka brzdné dráhy závisí na různých vlivech spojených s kvalitou brzdové soustavy a povrchu vozovky.

Průběh brzdění:



Obr. 1 Průběh brzdění, a) zpoždění vozidla; b) rychlost; c) dráha

Obrázek znázorňuje průběh brzdění na třech diagramech, které jsou vynášeny v závislosti na čase.

Jednotlivé časové úseky na diagramu a) mají následující význam:

Mezi zpozorováním překážky a vyvozením síly na brzdový pedál uplyne reakční doba t_r , která se skládá z reakční doby řidiče a z doby, která uplyne při přeložení nohy z plynového pedálu na brzdový pedál. Mezi okamžikem, kdy řidič začne působit na brzdový pedál a okamžikem, kdy se začne projevovat účinek brzdění, uplyne doba prodlevy brzdění t_p . Během této doby se musí překonat vůle v kloubech a ložiskách a brzdové obložení musí dolehnout na třecí plochu brzd.

Z časového průběhu zpoždění na obrázku a) dostaneme integrací průběh jízdní rychlosti b) a průběh dráhy c).

1.2 Dráha k zastavení vozidla

K zastavení vozidla je potřeba dráha která se skládá z několika úseků. Jednotlivé úseky odpovídají obrázku 1.

- 1) Dráha, kterou vozidlo ujede, nežli řidič zareaguje na překážku ($t_r + t_p$). Vozidlo jede stálou rychlostí.

$$s_1 = v_0(t_r + t_p)$$

- 2) Dráha ujetá během náběhu brzdění (t_n). Zpomalení je záporné

$$s_2 = v_0 t_n - \frac{\ddot{x}_u}{6} t_n^2$$

- 3) Dráha doby plného brzdění (t_u). Zpomalení je konstantní (rovnoměrně zpomalený pohyb)

$$s_2 = \frac{1}{2\ddot{x}_u} \left(v_0^2 - v_0 \ddot{x}_u t + \frac{\ddot{x}_u^2}{4} t_n^2 \right)$$

Celková dráha do zastavení vozidla se určí z jako součet rovnic 1), 2) a 3):

$$s_c \approx v_0 \left(t_r + t_p + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{v_0^2}{2\ddot{x}_u} - \frac{\ddot{x}_u}{24} t_n^2$$

Brzdná dráha bez zahrnutí reakční doby řidiče tj. Od okamžiku působení na brzdový pedál do zastavení vozidla. Uvažujeme zjednodušený průběh zpomalení kdy během prvního časového úseku je zpomalení nulové a poté skokem vzrůstá na hodnotu plného brzdného zpoždění \ddot{x}_u .

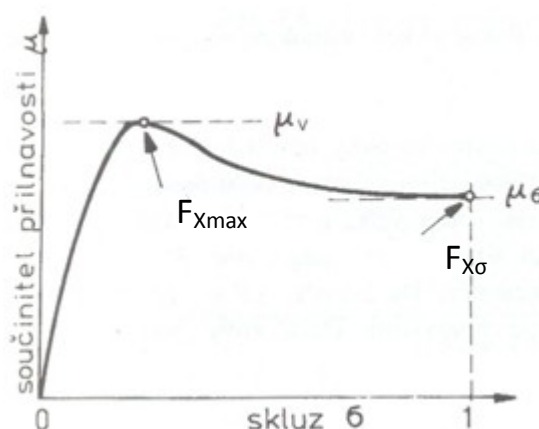
Brzdnou dráhu určíme ze vztahu:

$$s_c \approx v_0 \left(t_p + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{v_0^2}{2\ddot{x}_u}.$$

Mezinárodní předpisy a také český národní předpis (vyhláška č. 102/1995 Sb.) stanovují mj. přípustné dráhy pro provozní a nouzové brzdění různých vozidel. Např. požadavek na délku brzdné dráhy při provozním brzdění osobního automobilu je formulován vztahem:

$$s = 0,1v_0 + \frac{v_0^2}{150}$$

1.3 Skluz a součinitel adheze brzděného kola



Obr. 2 Skluzová charakteristika pneumatiky

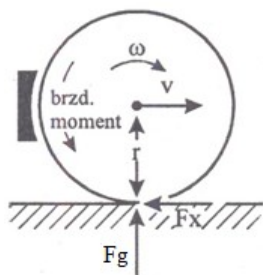
μ_v - součinitel válivé přilnavosti

μ_σ - součinitel skluzové přilnavosti

Přenesitelná síla mezi kolem a vozovkou je podle experimentálních výsledků určena vztahem:

$$F_x = \mu \cdot F_g,$$

Kde μ je tzv. součinitel přilnavosti, F_g je tíhová síla



Obr. 3 Kinematika brzděného kola

Skluz kola (pro brzděné kolo) je definován jako:

$$\lambda = \frac{v-u}{v} \quad (v \geq 0, u \leq v).$$

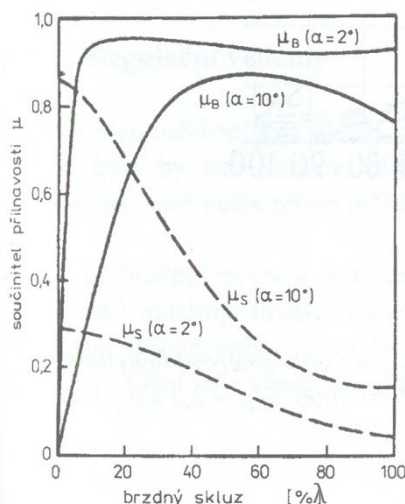
Aby byl zaručen co největší přenos obvodových sil mezi kolem a vozovkou, musí být brzdné popř. hnací momenty přiváděné na kolo takové, aby nevzniklo prokluzování, popř. blokování kol. Mimo to je u vozidel nutno zabránit prokluzování také proto, že vlivem klouzajících kol se stává vozidlo neovladatelným. Kola nepřenáší síly v příčném směru.

Tabulka hodnot součinitele přilnavosti pro různé povrchy:

Vozovka		Hodnota μ
beton	suchý	0,8 – 1,0
	mokrý	0,5 – 0,8
dlažba	suchá	0,6 – 0,8
	mokrá	0,3 – 0,5
polní cesta	suchá	0,4 – 0,6
	mokrá	0,3 – 0,4
hluboký písek, sníh		0,2 – 0,4
asfalt	suchý	0,6 – 0,9
	mokrý	0,3 – 0,8
makadam	suchý	0,6 – 0,8
	mokrý	0,3 – 0,5
tráva	suchá	0,4 – 0,6
	mokrá	0,2 – 0,5
náledí		0,1 – 0,3

Tabulka 1 Hodnoty součinitele přilnavosti pro různé povrchy

Okamžitá schopnost přenosu sil se udává pomocí součinitele adheze (přilnavosti), což je poměr podélné, nebo boční síly a svislého (radiálního) zatížení kola. Součinitel adheze závisí na povrchu vozovky, povětrnostních podmínkách, druhu pneumatiky, a především na velikosti skluzu mezi pneumatikou a vozovkou. Volně se valící kolo má nulový skluz, zablokované kolo představuje 100 % skluz. Příklad průběhu adheze v podélném a bočním směru v závislosti na skluzu je na obr. 4. Součinitel přilnavosti přitom závisí také na úhlu směrové úchyvky pneumatiky.

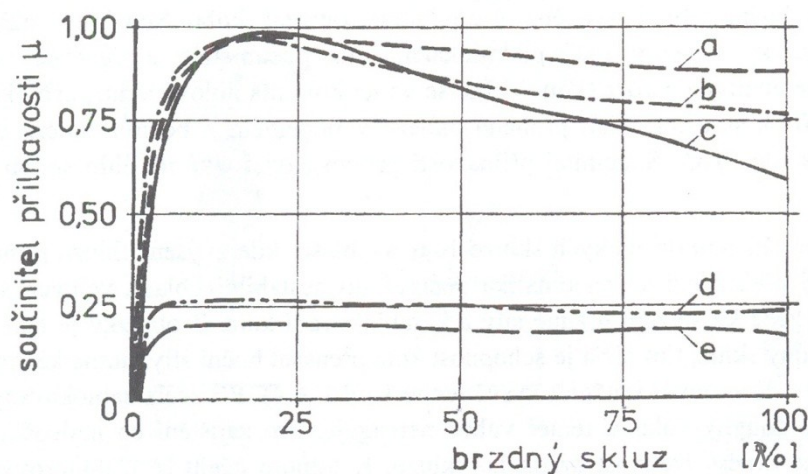


Obr. 4 - Příklady závislosti součinitele adheze pro brzdnou sílu μ_B a boční sílu μ_S na velikosti skluzu λ pro různou velikost úhlu směrové úchyvky α

Brzdění probíhá většinou při nízkých skluzech, tj. v oblasti, kde zvýšení skluzu přináší zvýšení brzdné síly. Při přebrzdění se pneumatika dostává do nestabilní oblasti velkých skluzů, kde zvýšení skluzu vede ke snížení brzdné síly a k zablokování kola. Z obrázku je také patrné, že čím větší je brzdný skluz, tím nižší je schopnost kola přenášet boční síly, nutné ke změně směru jízdy. Při zcela zablokovaných kolech tedy vozidlo na pohyby volantu téměř vůbec nereaguje. Pro zajištění co nejlepšího silového přenosu je nutno omezit velikost brzdného skluzu. K tomuto účelu se u motorových vozidel používají protiblokovací systémy známé pod zkratkou ABS (Anti-skid Brake System, Antiblockier-System), které umožňují dosažení optimální brzdné dráhy a současně zajišťují dostatečný přenos bočních (vodicích) sil.

Úlohou protiblokové regulace je zaručit optimální využití přilnavosti mezi kolem a vozovkou. Brzdný tlak musí být regulován, aby brzdý skluz na kolech byl stále udržován v oblasti maxima křivky $\mu=f(\lambda)$, obr.4. Z obr.5 plyne, že na uježděném sněhu nebo ledu nemá křivka přilnavosti v závislosti na skluzu žádné výrazné

maximum, tzn. součinitel valivé přilnavosti μ_v je stejný jako součinitel skluzové přilnavosti μ_σ .



Obr. 5 Závislost součinitele přilnavosti na brzdňém skluzu pro různé povrchy vozovky: a – suchý beton; b – suchý asfalt; c – mokrý beton; d – uježděný sníh; e – hladký led

Protipokluzový systém omezuje regulaci brzdňého tlaku skluz vznikající při brzděni, takže je možno docílit vysoké zpomalení vozidla při současně dobré vodící síle. Součinitel přilnavosti mezi pneumatikou a vozovkou a tedy možná brzdňá síla $F_{x\max} = \mu \cdot F_g$ pak závisí na druhu pneumatiky, na vlastnostech povrchu vozovky a také na úhlu směrové úchytky. Systém ABS musí mít proto vlastnosti adaptivní regulace, která přizpůsobuje protiblokovou regulaci na různé vlastnosti pneumatiky a vozovky [1]

1.4 Protiblokovací systém ABS

Protiblokovací systém je částí brzdové soustavy, který samočinně řídí skluz ve směru otáčení kola (tj. podélný skluz) na jednom nebo několika kolech vozidla. Při kritických jízdních situacích, kdy řidič prudce brzdí, zejména pak při brzděni na mokré nebo zamrzlé vozovce, může dojít k zablokování kol. Následkem toho ztrácí vozidlo směrovou stabilitu, je neovladatelné a zpravidla dochází ke smyku vozidla.

V těchto jízdních situacích pomáhá řidiči protiblokovací systém ABS. Včas rozezná blokování jednoho nebo více kol a sníží tlak v brzdové soustavě. Vozidlo je

opět říditelné, chová se stabilně a je možno plynule dokončit brzdění. Systém ABS většinou zkracuje brzdnu dráhu.

Na protiblokovací systém ABS jsou kladeny tyto požadavky:

- během regulovaného brzdění musí být zachována říditelnost a stabilita vozidla,
- nutná řídící korekce (natačení volantu) musí být co nejmenší, také při brzdění na vozovce s různou přilnavostí na levé a pravé straně vozidla (tzv. μ - split),
- regulace musí pracovat v celém rychlostním rozsahu vozidla,
- regulační soustava musí optimálně využívat přilnavosti kol k vozovce, přičemž říditelnost má přednost před zkrácením brzdné dráhy,
- regulace brzdění se musí velmi rychle přizpůsobit změnám přilnavosti vozovky,
- také při brzdění na nerovné (vlnité) vozovce musí být vozidlo ovladatelné při libovolně prudkém brzdění; regulace brzdění musí rozeznat aquaplaning a vhodně na něj reagovat,
- je-li rozeznána závada funkce ABS, musí dojít k vypnutí protiblokovací soustavy a řidič musí být o závadě informován (kontrolka ABS),
- při poruše ABS musí být zachována plná funkčnost základní brzdové soustavy bez ABS.

Tyto požadavky jsou splněny pouze v případě, že jsou regulována všechna kola vozidla.[1]

1.5 Princip činnosti ABS

Na obr. 6 je schéma regulačního obvodu protiblokovacího systému ABS. Regulační obvod jak pro kapalinové tak pro vzduchotlaké brzdy se skládá z několika základních prvků:

Řídící jednotka ABS

Modulátor brzdného tlaku s elektromagnetickými ventily

1 - Brzdový pedál

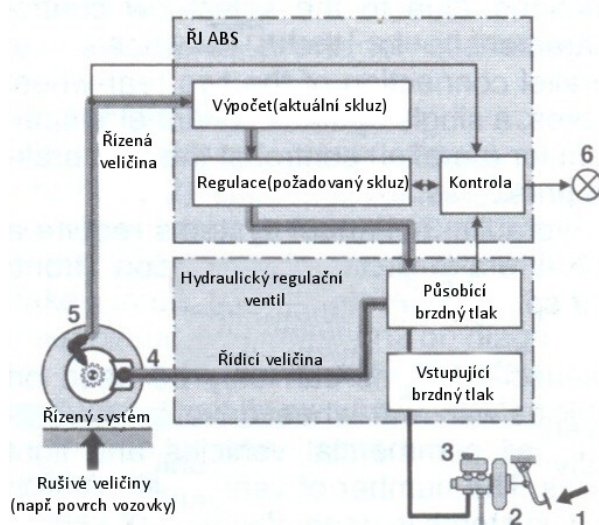
2 - Posilovač brzd

3 - Hlavní brzdový válec se zásobníkem brzdové kapaliny

4 - Brzdový třmen

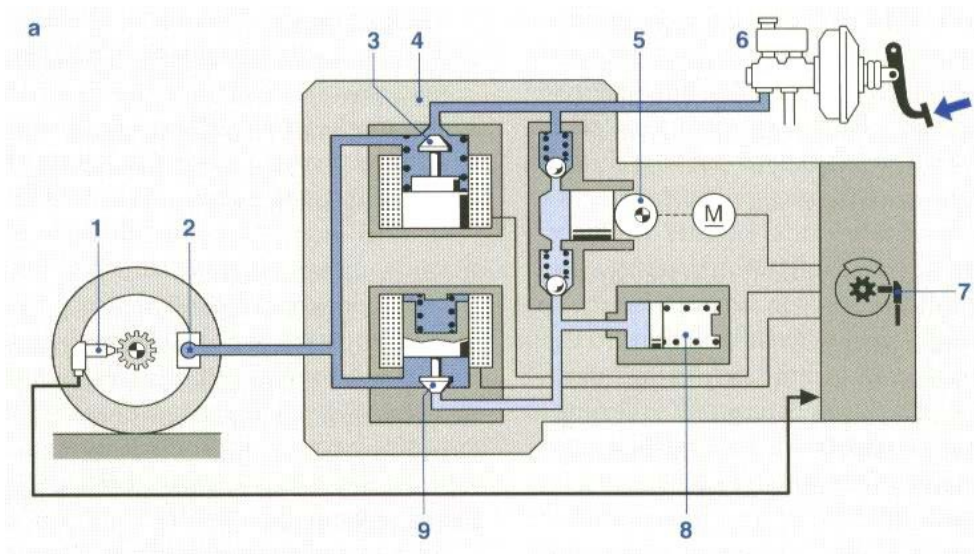
5 - Snímač otáček kola

6 - Indikace



Obr. 6 ABS regulační obvod [2]

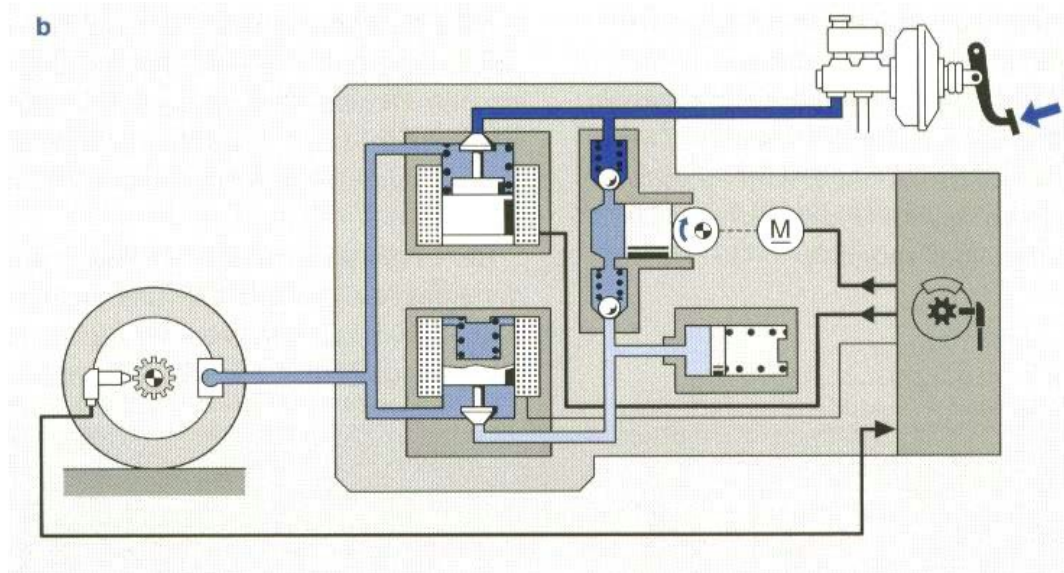
Při zapnutí zapalování a libovolném jízdním stavu, snímají snímače otáček na všech čtyřech kolech signály, které jsou potřeba pro výpočet obvodových rychlostí kol a posílají je dál do řídicí jednotky. Za normálních okolností jsou elektromagnetické ventily v poloze zvyšování tlaku (Obr.7). Když řídicí jednotka z přijímaných signálů rozpozná nebezpečí blokování kol, spustí hydraulické čerpadlo pro zpětnou dodávku a nastaví magnetické ventily příslušných kol. Každé kolo je ovlivněno jemu přiřazenou dvojicí elektromagnetických ventilů tak, aby nezávisle na jiných kolech mohlo optimálně přispět k brzdění (individuální regulace).



Obr. 7 Modulace brzdného tlaku ABS 5.0, fáze zvyšování tlaku

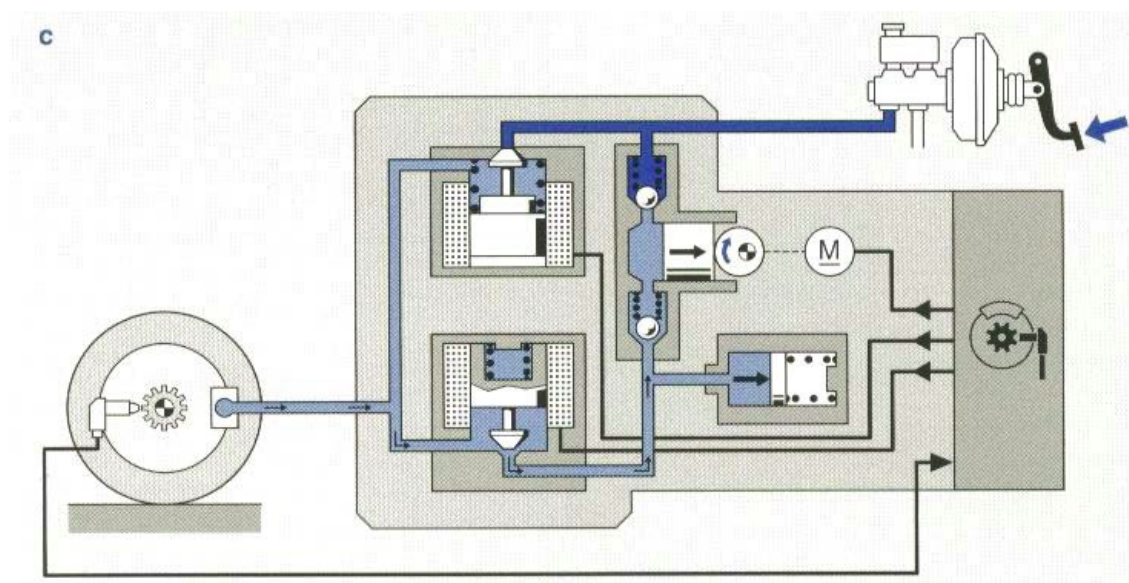
1 – snímač otáček, 2 – brzdový váleček, 3 – vstupní ventil, 4 – hydraulická jednotka, 5 – čerpadlo zpětné dodávky, 6 – hlavní brzdový válec, 7 – řídicí jednotka, 8 – zásobník, 9 – výstupní ventil.

V druhé fázi regulace ABS udržování tlaku, (Obr.8) je na vstupní ventil přiveden proud a je uzavřen. Výstupní ventil je i nadále uzavřen a hlavní brzdový válec se tak oddělí od brzdového válečku a tlak v brzdě kola zůstává konstantní.



Obr. 8 - Modulace brzdného tlaku ABS 5.0, fáze udržování tlaku

Ve třetím stavu snižování tlaku (Obr.9) je navíc přiveden proud na výstupní ventil a ten je naopak otevřen. Tím se brzda kola hydraulicky spojí s čerpadlem pro zpětnou dodávku, takže tlak v brzdě kola klesá.

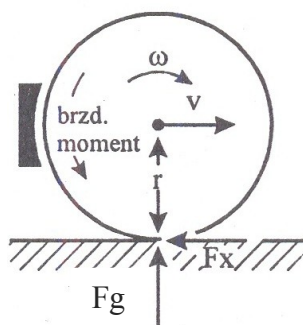


Obr. 9 Modulace brzdného tlaku ABS 5.0, fáze snižování tlaku

Na zadní nápravě určuje kolo s menším součinitelem přilnavosti společný tlak v obou brzdách kol (princip select - low). Tím se kolo s větším součinitelem přilnavosti při přítomnosti ABS nepatrně nedobrzdí. Následkem toho je brzdná dráha o něco delší, což se však vrátí zpět ziskem stability vozidla. Řídicí jednotka přepíná dvojice elektromagnetických ventilů do tří různých stavů. Tím se může brzdný tlak nejen plynule, ale vlivem impulsního řízení také stupňovitě (a tím mírně) snižovat nebo zvyšovat. Podle povahy vozovky probíhá za sekundu 4 až 10 regulačních cyklů. Tuto reakční rychlost dosahuje ABS elektronickým zpracováním signálů a krátkými dobami odezvy.[6]

1.6 Regulační veličiny

Protože více nebo méně výrazná maxima součinitele přilnavosti vznikají při přibližně stejném skluzu, byla by tato veličina ideální regulační veličinou. Protože skluz mezi pneumatikou a vozovkou však nelze přímo měřit, musí se nalézt jiné vhodné regulační veličiny. Úhlové zpoždění kola je vhodnou veličinou pro automatický protiblokovací systém.



Obr. 10 Silové poměry na brzděném kole

Elektronicky řízené systémy ABS zjišťují úhlové zpoždění kola zpravidla derivací signálů otáček kola, které snímají vhodné snímače. K exaktní regulaci brzdění jsou však zapotřebí ještě další hodnoty.

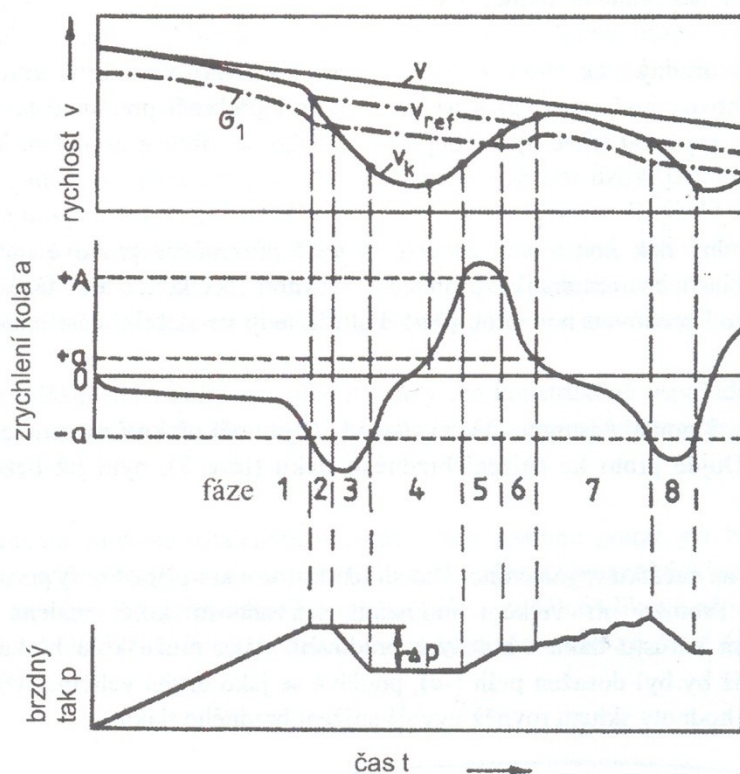
Jako druhá regulační veličina se často používá „relativní skluz“. Z rychlostí více kol (např. levé přední a pravé zadní) se vypočítá referenční rychlost, která v pozorovaném okamžiku odpovídá rychlosti brzděného kola pro optimální skluz. Při částečném brzdění určuje referenční rychlost rychleji se otáčející kolo. Dojde-li při

plném brzdění k regulaci ABS, odlišují se již rychlosti kol od rychlosti vozidla a nemohou již bez korekce sloužit k výpočtu referenční rychlosti. Řídící jednotka si během fáze regulace vytváří referenční rychlost, vycházející z rychlosti na počátku regulace a tu postupně snižuje. Porovnáním skutečné rychlosti s referenční rychlostí se získají „relativní“ hodnoty skluzu.

Referenční veličinou k úhlovému zpoždění kola, může být podélné zpoždění vozidla. V tomto případě by musel být na vozidle umístěn snímač zrychlení. [1]

1.7 Regulační cyklus

Průběh regulačního cyklu je v principu stejný pro všechny systémy ABS řízené úhlovým zpožděním kola a relativním skluzem. Řidičem příliš vysoko nastavený brzdný tlak se reguluje tak, že úhlové zpoždění kola vykyvuje mezi horní a dolní hranicí.



Obr. 11 Regulační cyklus ABS

Celý regulační cyklus je rozdělen na 8 fází

Během fáze 1, kdy řidič zvyšuje brzdny tlak vzrůstá úhlové zpoždění kola ω a v důsledku skluzu klesá obvodová rychlost kola u rychleji než rychlost vozidla v .

Překročí-li zpoždění kola prahovou hodnotu, která je charakteristická pro maximální přilnavost ($-a$ na obr.11), je brzdný tlak P_B udržován na konstantní hodnotě (fáze 2). Tlak v této fázi není snižován, protože by mohla být překročena prahová hodnota zpoždění ($-a$) ve stabilní části charakteristiky přilnavost/skluz a tím by se prodlužovala brzdná dráha. Během fáze 2 klesá referenční rychlost v_{ref} . Z referenční rychlosti je odvozena prahová hodnota skluzu λ_1 .

Na konci fáze 2 překročí obvodová rychlost kola u prahovou hodnotu skluzu λ_1 . Ve fázi 3 proto dochází ke snížení brzdného tlaku P_B o hodnotu Δp_B , přičemž pokles tlaku probíhá tak dlouho, až je zpoždění kola menší než prahová hodnota ($-a$). Následuje konstantní brzdý tlak, fáze 4. Během této fáze vzrůstá úhlové zrychlení kola, překročí nejprve prahovou hodnotu ($+a$) a na konci fáze 4 překročí prahovou hodnotu ($+A$). Brzdý tlak se začne zvyšovat (fáze 5) a stoupá tak dlouho, až úhlové zrychlení kola je opět menší než mez ($+A$).

Během fáze 6 je brzdý tlak konstantní, protože je ještě překročena prahová hodnota ($+a$). (Rozhraní stabilní oblasti charakteristiky přilnavost — skluz). Na konci této fáze je hodnota zrychlení kola opět pod prahovou hodnotou ($+a$), kolo je tedy ve stabilní části charakteristiky přilnavost - skluz.

Brzdý tlak je ve fázi 7 pomalu (stupňovitě) zvyšován, až je opět překročena prahová hodnota zpoždění kola ($-a$). Dojde proto ke snížení brzdného tlaku (fáze 8), nyní již bez ohledu na prahovou hodnotu λ_1 .

Fáze udržování tlaku na začátku regulačního děje slouží k filtrování případných poruch změnou vnějších podmínek. Protože při velkém momentu setrvačnosti kola, malém součiniteli přilnavosti a pomalém nárůstu tlaku v kolovém brzdovém válci může kolo blokovat již při opatrném brzdění, aniž by byl dosažen práh ($-a$), používá se jako druhá veličina ABS relativní skluz: dosažení určité hodnoty skluzu rovněž vyvolá snížení brzdného tlaku. [1]

1.8 Regulace stáčivého momentu (systém GMA)[2]

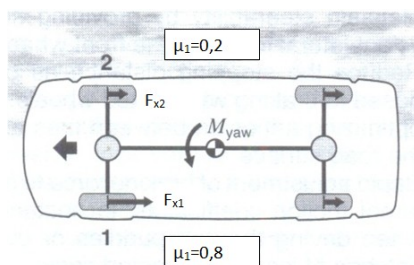
Jakmile vozidlo brzdí na povrchu s nestejným součinitelem tření (např. kola na levé straně na suchém asfaltu a kola na pravé straně na ledu). Značně rozdílné brzdné síly na předních kolech vedou ke vzniku otáčivé síly (stáčivý moment – yaw moment) kolem svislé osy vozidla.

U menších aut, ABS musí být doplněno o dodatečný systém GMA který zavádí zpoždění do brzdění kvůli eliminaci vzniku stáčivé síly při panickém brzdění na nestejněsměrném povrchu vozovky. Systém GMA zpožďuje nárůst tlaku v brzdovém okruhu předního kola které brzdí na části vozovky s vyšším součinitelem tření (kolo „high“).

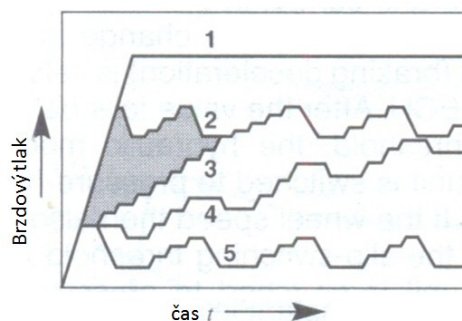
Princip systému GMA je ukázán v grafu: Křivka 1 představuje tlak v hlavním brzdovém válci. Bez systému GMA brzdový tlak na kole které jede po asfaltu velmi rychle dosáhne křivky p_{high} (křivka 2), zatímco brzdový tlak na kole které jede po ledě dosáhne jenom hodnoty p_{low} (křivka 5). Každé kolo tedy brzdí s maximální možnou přenesitelnou silou (individuální řízení).

Systém GMA typu 1 (křivka 3) je navržen pro použití v automobilech s méně kritickými poměry a charakteristikami pro řízení, zatímco systém GMA typu 2 je navržen pro auta které mají znatelnou tendenci k přetáčivosti vlivem stáčivé síly při brzdění.

Ve všech případech, ve kterých GMA systém je uveden do funkce je „high“ kolo zprvu nedobrzděno. To znamená že systém GMA musí být vždy velmi pečlivě navržen pro konkrétní vůz s uvážením, že prodlužuje celkovou brzdovou dráhu.



Obr. 12 Vznik stáčivého momentu

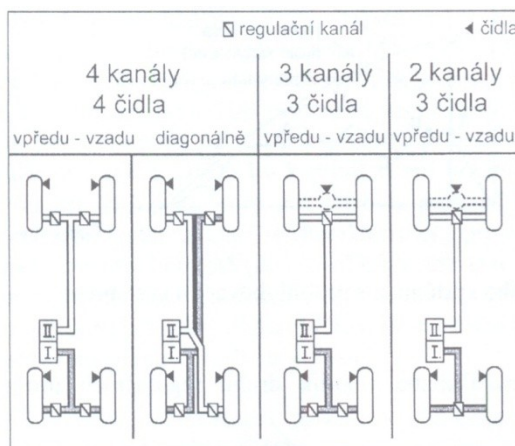


Obr. 13 Regulace stáčivého momentu

1 - Tlak v hlavním brzdovém válci, 2 - Brzdový tlak na kole „high“ bez GMA, 3 – Brzdový tlak na kole „high“ s GMA1, 4- Brzdový tlak na kole „high“ s GMA 2, 5- Brzdový tlak na kole „low“

1.9 Varianty ABS systémů

Jsou k dispozici rozdílné varianty ABS systému v závislosti na konstrukci brzdového systému, pohonného systému vozu, požadavků na funkci a cenu. Nejběžnější rozdělení brzdových sil ve voze bývá diagonální rozdělení (brzdový okruh do X), následovaný předozadním rozdělením (brzdový okruh II). Rozdělení brzdového okruhu typu HH a HI jsou specializované aplikace a jsou jen výjimečně kombinované s ABS.



Obr. 14 Varianty protiblokovacích systémů pro osobní automobily

Varianty ABS systémů jsou rozdělené podle počtu řídicích kanálů a počtu snímačů otáček kol.

4-kanálové/4-snímačové systémy

Tyto systémy (viz. obr.14 varianty 1 a 2) umožňují individuální kontrolu brzdného tlaku na každém kole čtyřmi hydraulickými kanály. Používá se v případě rozdělení brzdových okruhů na přední a zadní nápravu (typ II) nebo diagonálně (typ X). Každé kolo má svůj snímač otáček k monitorování otáček kola.

Velmi zjednodušená verze ABS byla vyvinuta speciálně pro Japonský trh a jejich malá auta. Tyto verze odstranili tlumící komory a čerpadlo pro zpětnou dodávku tlaku. Menší množství komponent v porovnání s konvenčními systémy nabízí značnou finanční úsporu ale také vyžaduje značné kompromisy ve funkčnosti. Takovéto typy systému se nyní již téměř nepoužívají.

3-kanálové/3-snímačové systémy

(obr.14 varianta 3) Namísto obvyklého uspořádání se snímači na každém kole, v této variantě zadní kola sdílejí jeden snímač otáček který je umístěn na diferenciálu zadní nápravy. Vzhledem k charakteristikám diferenciálu toto řešení umožňuje měření rozdílu otáček na zadních kolech s určitými omezeními. Vzhledem k paralelnímu spojení brzd zadních kol, jeden hydraulický kanál je dostatečný pro (paralelní) řízení brzdného tlaku v zadních brzdách. 3-kanálový hydraulický systém potřebuje rozdělení brzdného okruhu na přední a zadní (typ II).

3-kanálový systém může být používán jen u vozů s pohonem na zadní nápravě tj. Malá užitková vozidla a dodávky. Počet vozidel osazených tímto systémem obecně klesá.

2-kanálové/1 nebo 2-snímačové systémy

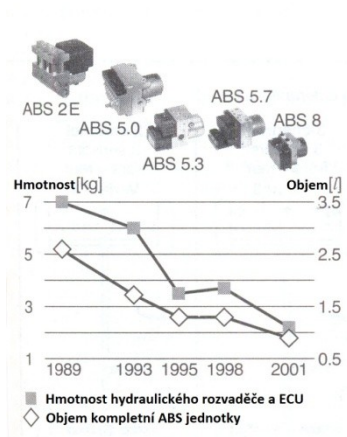
Dvoukanálové systémy byly vyvinuty především z důvodu potřeby menšího počtu komponentů za účelem redukce ceny vozu. Tyto systémy nebyly příliš populární, jelikož nedosahovaly stejné funkčnosti a kvality jako plně osazené systémy. Tyto systémy se v automobilech již téměř nepoužívají.

Některé lehké užitkové vozy prodávané na americkém trhu s předozadním rozdělením brzdových okruhů jsou stále osazeny RWAL systémem (Rear Wheel Anti Lock) – speciální zjednodušená verze 2 kanálového systému sestávajícího se snímače na zadní ose diferenciálu a jedním řídícím kanálem (bez čerpadla pro zpětnou dodávku tlaku) který brání zablokování zadních kol.[2]

1.10 Modelové řady ABS

První systémy byly dokonce čistě mechanické, až později byla využita elektronika a její bouřlivý rozvoj umožnil podstatně zkrátit reakční dobu a také celý systém rozměrově miniaturizovat. Starší systémy ABS fungovaly pouze na předních kolech automobilu při brzdění více zatížených a důležitých pro zachování směru vozu. Podobně jako brzdový systém, může být systém vícekanálový, přičemž každý kanál reguluje brzdovou sílu jednoho až několika kol. Nejdokonalejší systém je tedy ten, kdy se počet kanálů rovná počtu kol vozu.[5]

Hmotnost a objem jednotlivých ABS/ESP jednotek



Obr. 15 vývoj jednotlivých typů ABS jednotek z hlediska hmotnosti a objemu

ABS 2S a ABS 5.0

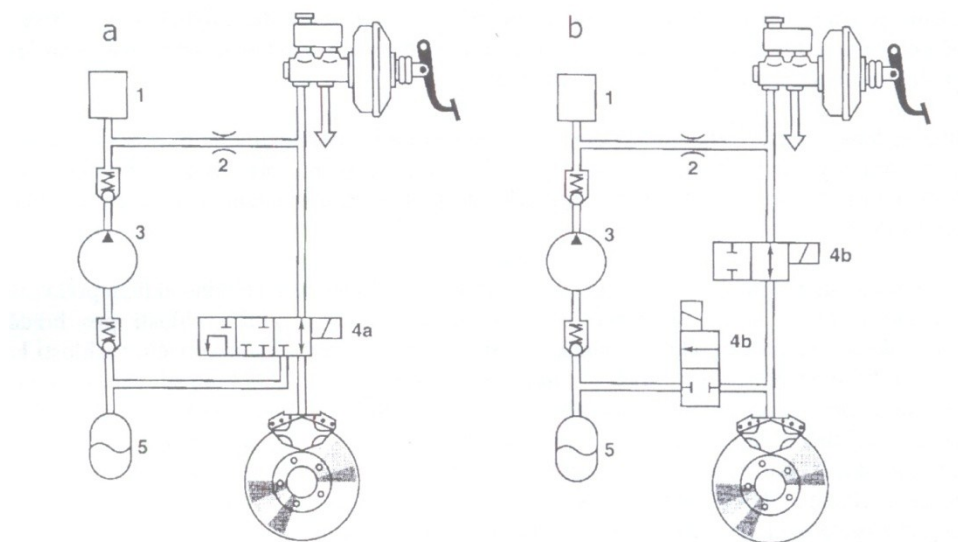
Protiblokovací systém Bosch ABS 5.0 vznikl dalším vývojem systému ABS 2 S a je charakteristický především následujícími znaky:

- Stavebnicovým systémem pro různá použití,
- Principem zpětné dodávky s uzavřeným brzdovým okruhem,
- Principem dvou mikropočítačů s rozsáhlým kontrolním software

Nejvýznamnějším rozdílným prvkem oproti ABS 2 S jsou elektromagnetické ventily, ABS 2S pracuje s 3/3cestnými elektromagnetickými ventily, ABS 5.0 je vybaven 2/2cestnými elektromagnetickými ventily. U brzdových okruhů s rozdělením „přední/zadní“ náprava existuje tří-kanálová verze hydraulické jednotky, u rozdělení diagonálního se používá čtyř-kanálové verze hydraulické jednotky.[3]

ABS 5.3

Systém Bosch ABS 5.3 byl vyvinut pro osobní automobily nižších tříd. Při stejném rozsahu funkcí jako ABS 5.0 má mnohem menší zástavbové rozměry. [3]



Obr. 16 Porovnání systémů ABS: a) Bosch 2s; b) Bosch 5.0

1 – tlumicí komora; 2 – škrcení; 3 – zpětné čerpadlo; 4a – ventil 3/3; 4b – ventily 2/2; 5 - zásobník

ABS 8.0

ABS 8.0 je současnou generací ABS a bylo představeno roku 2001 firmou Bosch. Je to modulární systém který umožňuje aby brzdové řídicí systémy ABS, TCS a ESP byly implementovány do jednoho produktu. Tímto se docílilo dalšího zefektivnění výroby a produkce.[4]

Systém ABS 8.0 těží hlavně z proudově řízených ventilů, které podstatně zlepšují funkci (např. adaptace na změny v součiniteli tření) a ze snadnosti jejich řízení. [2]

1.11 Hydraulický posilovač brzd

U standardních automobilů se spalovacími motory, je většinou součástí brzdového okruhu podtlakový posilovač brzd. Tento zesiluje brzdnu sílu vyvolanou řidičem na brzdový pedál. Podtlakový posilovač brzd využívá podtlak, který vzniká v sání zážehových/benzinových motorů nebo podtlak, který je produkován vakuovým čerpadlem u motorů vznětových/diesellových.

Jelikož v elektromobilech není k dispozici ani jeden z těchto zdrojů podtlaku vzhledem k absenci spalovacího motoru je potřeba využít nějaký jiný systém pro posílení brzdové síly. Možným řešením je použití hydraulického posilovače brzd. Tento úzce spolupracuje s hydraulickým posilovačem řízení.

Další možností nahrazení podtlakového posilovače brzd se kromě hydraulického posilovače jeví plně elektronický brzdový systém popř. hybridní elektrohydraulický systém kde jsou kolové brzdy řízeny elektronicky a ovládány elektromotory.

Hydraulický posilovač brzd se skládá z následujících komponent:

- Hydraulické čerpadlo
- Zásobník s filtrem
- Tlakem řízený průtokový ventil
- Zásobník na tlakovou kapalinu – akumulátor
- Hlavní brzdový válec se zásobníkem na brzdovou kapalinu

Hydraulické čerpadlo zásobuje posilovač brzd a zároveň posilovač řízení dostatečným průtokem kapaliny dostačující pro oba dva systémy. Čerpadlo dodává kapalinu k tlakem řízenému průtokovému regulátoru. Ten rozděluje průtok z čerpadla mezi servořízení a dobíjení hydraulického tlakového akumulátoru.

2 Možnosti rekuperačního brzdění elektromobilu [7]

Jedna z nejdůležitějších funkcí elektromobilů, Hybridních vozů a vozů na palivové články je jejich schopnost využití značného množství energie brzdění. Elektromotory v elektromobilech mohou být řízeny ve funkci generátorů pro převedení kinetické nebo potenciálové energie vozu v elektrickou energii, která může být uchována v bateriích a znovupoužita pro pohon vozu.

Obecně, je moment potřebný pro brzdění vozu větší než moment který může poskytnout elektromotor, obzvláště v případě prudkého brzdění. V elektromobilech a hybridních vozech tedy musí elektrické rekuperační brzdění úzce spolupracovat se standardními mechanickými třecími brzdami.

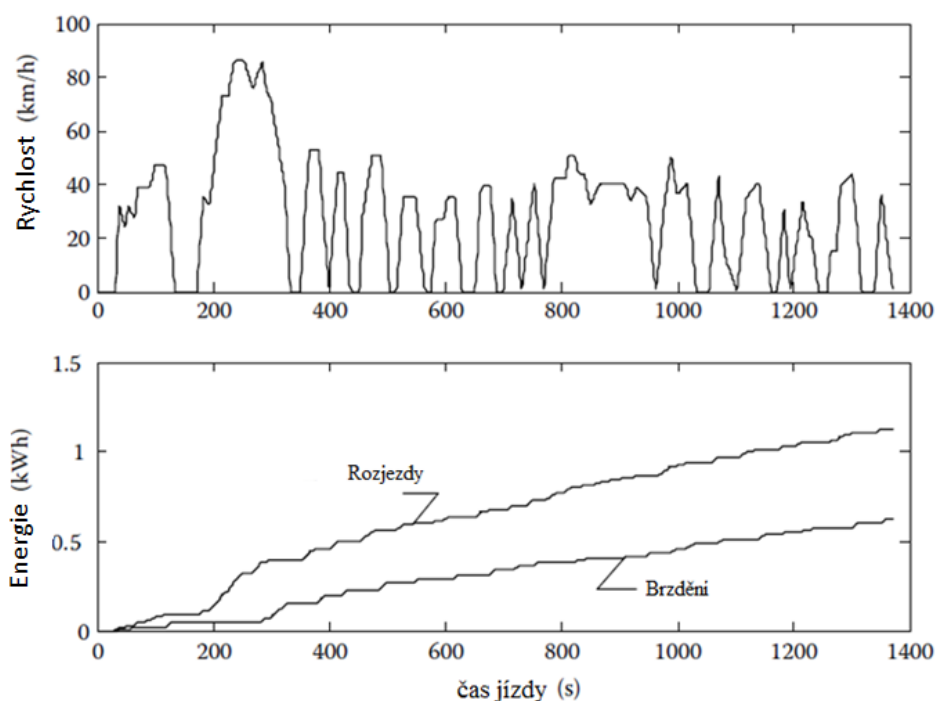
Je známo mnoho konfigurací a řídicích strategií pro podobné systémy. Hlavním cílem konstrukce a řídicí elektroniky takového systému je zajištění potřebného brzdného výkonu a zpomalení vozu požadovaného řidičem a zároveň obnovení tolika brzdné energie kolik je jen možné.

Rekuperační brzdění v elektromobilech představuje z hlediska návrhu systému složitější problém. Jsou zde dvě hlavní otázky k řešení: jak rozdělit celkový potřebný brzdny moment mezi regenerativní brzdění a mechanické brzdy tak aby bylo obnoveno co možná největší množství brzdné energie a jak rozdělí celkovou brzdnou sílu mezi přední a zadní nápravu pro dosažení vyrovnaného brzdného výkonu.

2.1 Energie spotřebovaná brzděním v městském provozu

Jakmile je vozidlo provozováno v městském provozu bohatém na zastavování a rozjíždění značná část energie je mařena častým brzděním. Brzděním vozu o hmotnosti 1500kg z rychlosti 100km/h do nuly se v mechanických brzdách rozptýlí přibližně 0,16kWh energie.

Následující graf znázorňuje, že energie spotřebovaná při brzdění dosahuje až 34% z celkové energie spotřebované v městském provozu. Ve velkých městech jako je například New York může dokonce dosáhnout až 80%.

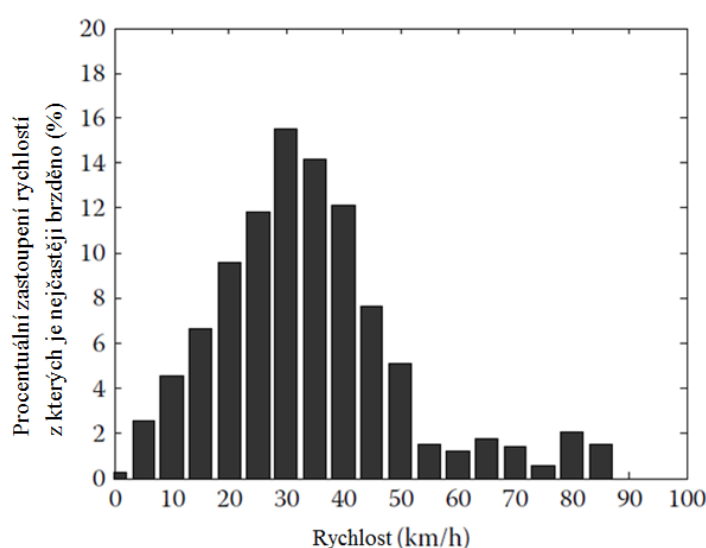


Graf 1 Rozjezdová a brzdová energie zmařená v městském provozu

2.2 Nejčastější rychlosti brzdění

Následující graf znázorňuje nejčastější rychlosti, při kterých probíhá brzdění. Je z něj zřejmé, že jen přibližně 10 procent z celkové brzdné energie je spotřebováno v rychlostním rozsahu pod 15km/h.

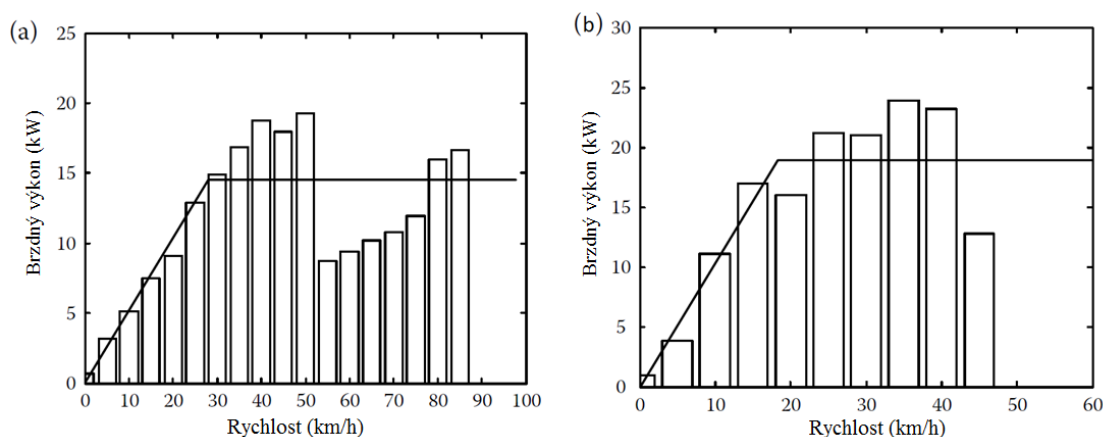
Tento fakt znamená, že není potřeba v elektromobilech zařizovat provozní efektivitu rekuperačního brzdění pro velmi nízké rychlosti. Ve skutečnosti je navíc obtížné generovat elektrickou energii v nízkých rychlostech. Toto je dáno nízkým napětím generovaným při nízkých otáčkách elektromotoru. Takže v rychlostech nižších než 15km/h je brzdný výkon vozu zajištěn hlavně mechanickými brzdami.



Graf 2 Závislost nejčastějšího brzdění vzhledem k rychlosti jízdy

2.3 Nejčastěji využívaný brzdný výkon

Následující graf znázorňuje jaký brzdný výkon je nejčastěji využíván pro zpomalení nebo zastavení vozu v typickém městském provozu. Je z něj patrné, že jen přibližně 15% z celkové brzdné energie je spotřebováno v rozsahu výkonu, který je větší než 14,5kW. Z tohoto výsledku tedy vyplývá, že elektromotor o výkonu 15kW je schopný rekuperovat kolem 85% celkové brzdné energie která je při brzdění k dispozici.



Graf 3 Používaný brzdňý výkon v závislosti na rychlosti; a) typizovaný FTP75 městský provoz, b) New York City

Další skutečnost, které si lze povšimnout z grafu závislosti brzdňé síly na rychlosti z které automobil brzdí je ta, že průběh závislosti se shoduje s průběhem momentové charakteristiky elektromotorů. V této charakteristice výkon z počátku narůstá (konstantní moment) a poté je konstantní. Z tohoto hlediska tedy není potřeba žádné speciální konstrukce a řízení elektromotoru pro účely rekuperačního brzdění.

Brzdňý výkon vozu je možné spočítat podle následujícího vztahu

$$P_d = \frac{v}{1000} \left(m \cdot g \cdot f + \frac{1}{2} \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 + m \cdot J \cdot \frac{dv}{dt} \right) \quad P_d \leq 0$$

$m[kg]$	hmotnost vozu
$v[m/s]$	podélná rychlost vozu
$g[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení $9,81 m \cdot s^{-2}$
$f[-]$	odpor valení pneumatiky
$\rho_v[kg \cdot m^{-3}]$	hustota vzduchu $1.205 kg \cdot m^{-3}$
c_x	aerodynamický odpor vozu
$S_x[m^2]$	průmět čelní plochy vozu
J	moment setrvačnosti kola
$\frac{dv}{dt}[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení automobilu (záporné pro zpomalení)

2.4 Brzdná zpomalení v typickém městském provozu

Z grafu procentuálního zastoupení míry brzdného zpomalení při brzdění v městském provozu je zřejmé, že ve většině případů je brzdění velmi lehké. Maximální hodnota brzdného zpomalení je menší než 0,15g. Z toho vyplývá, že pokud máme elektromotor, který je schopen brzdit automobil alespoň s tímto brzdným zpomalením je dostačující pro většinu případů. Tyto poznatky o brzdění automobilu jsou velmi nápomocné při návrh potřebného výkonu elektromotoru a také kapacity baterií tak aby byl schopen obnovit většinu brzdové energie, která je k dispozici v provozu a to bez zbytečného předimenzování. Maximální brzdný moment požadovaný od elektromotoru je tedy takový, který je schopen brzdit vozidlo se zpomalením cca 0,15g. Tudíž, není potřeba osazovat nějak velké elektromotory.

2.5 Rozdělení brzdné síly mezi nápravami

Pro dosažení potřebného brzdného výkonu osobního automobilu je potřeba, aby brzdný výkon byl rozdělen mezi přední a zadní nápravu. Větší brzdný výkon je zpravidla přiváděn na přední nápravu, z toho vyplývá, že umístění elektromotoru pro rekuperační brzdění na přední nápravě je výhodnější nežli na zadní. Nicméně pro ostatní druhy automobilů, jako jsou nákladní vozy, je umístění na zadní nápravě výhodnější. V případě elektromotoru umístěného jen na přední nápravě, je z hlediska množství obnovitelné energie možné dělit brzdnou sílu mezi přední a zadní nápravu ve prospěch přední nápravy. Tedy přidělit více brzdné síly na přední nápravu kde je umístěn elektromotor než je tomu u standardních vozů, kde jsou brzdné síly rozděleny tak, aby bylo dosaženo optimálního dělení brzdné síly.

2.6 *Součinnost mechanických brzd a rekuperačního brzdění*

Jakmile je rychlosti kola menší než daný limit, např. 15km/h a automobil jede velmi malou rychlostí nebo se rychlost kola blíží k zablokování, není využíváno regenerativního brzdění. Elektromotor neprodukuje žádný brzdňý moment. Brzdění je v těchto případech kompletně zajištěno jen mechanickými třecími brzdami. Toto je dáno momentovou charakteristikou elektromotoru a jeho malým brzdňým výkonem při nízkých otáčkách.

V případech kdy jsou otáčky kol vyšší než daná minimální hranice pro rekuperační brzdění a zároveň je brzdné zpomalení požadované řidičem menší než maximální možné dosažitelné zpomalení za použití jen rekuperačního brzdění (0,15g viz graf.), je veškerá brzdná síla působící na kola produkována elektrickými rekuperačním brzděním elektromotoru a není potřeba ji doplňovat mechanickými brzdami. Řidičem požadované brzdné zpomalení je reprezentováno mírou sešlápnutí brzdového pedálu. Ta může být měřena snímačem polohy umístěným v brzdovém pedálu. U standardních brzdových systémů s plně hydraulickým brzdovým okruhem je nulová mechanická brzdná síla na začátku zdvihu brzdového pedálu a může být implementována vytvořením větší mezery mezi brzdovými deskami a kotoučem nebo malou modifikací hlavního brzdového válce.

Když je požadované brzdné zpomalení větší než daná hodnota maximálního možného dosažitelného zpomalení za použití jen rekuperačního brzdění (0,15g viz graf.), je brzdňý výkon zajišťován elektromotorem i mechanickými brzdami pro zajištění optimálního brzdného výkonu.

2.7 *Spolupráce brzd v případě mezních stavů*

Při kritických situacích v případě silného brzdění kdy jsou v provozu oba druhy brzd jak elektrického rekuperačního brzdění, tak mechanických brzd a potřebě aktivace systému ABS mechanických brzd z důvodu tendence kol k prokluzování je potřeba odpojení brzdné síly od elektromotoru, aby tato nekolidovala s brzdňými silami od mechanických brzd a tím nerušila správnou funkci systému ABS. Elektromotor a jeho brzdňý moment může být v tomto případě úplně vyřazen z funkce, nebo být provozován

v režimu, kdy svým chováním a vyvíjeným brzdným momentem zastává funkci spalovacího motoru. Brzdný moment je tedy jen velmi malý a měl by přibližně odpovídat hodnotám odporu setrvačných hmot a překonání kompresních poměrů spalovacího motoru.

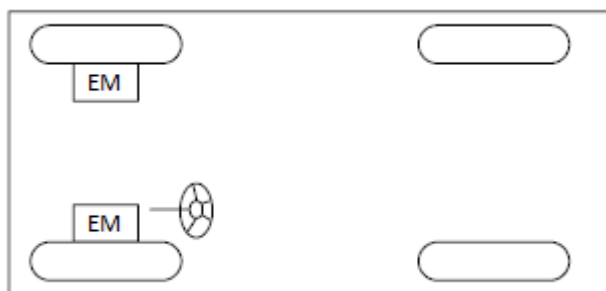
V případě, že požadované brzdné zpomalení od řidiče nabývá menších hodnot a veškerý brzdný moment je zajišťován jen elektromotorem je i tento pro případ zajištění jízdní stability na povrchu vozovky s nižším součinitelem tření opatřen systémem o principu ABS.

3 *Podrobná analýza možného řešení*

Další část textu se zabývá třetím bodem zadání diplomové práce a to podrobnějším popisem konkrétního možného řešení systému ABS pro elektromobil a jeho analýzou.

3.1 *Koncepce elektromobilu*

Uvažovaný elektromobil v mém řešení je poháněn elektromotory na obou kolech přední nápravy. Spojení mezi elektromotorem a kolem je pevné, bez spojky a bez dalšího přídavného převodu. Elektromotory jsou uvažovány stejnosměrné, cize buzené permanentními magnety. Elektromotory jsou každý o přibližném výkonu 6kW. Pro napájení elektromotorů a řízení jejich vstupního napětí jsou použity tyristorové měniče napětí. Pro řízení stejnosměrných motorů se jeví nejvhodnější 4kvadrantový měnič, který dokáže řídit elektromotor jak v režimu pohonu tak i brzdění a to oběma směry jízdy dopředu i vzad. Elektrická energie je uchovávána a dodávána z akumulátorů, v dnešní době patří mezi nepoužívanější lithium-iontové či lithium-polymerové technologie. Baterie mohou být pro větší výkon a pokrytí odběrů a dodávek velkých proudů při rozjezdu a rekuperačním brzdění doplněny o ultrakapacitory, které doplňují baterie o potřebný výkon.



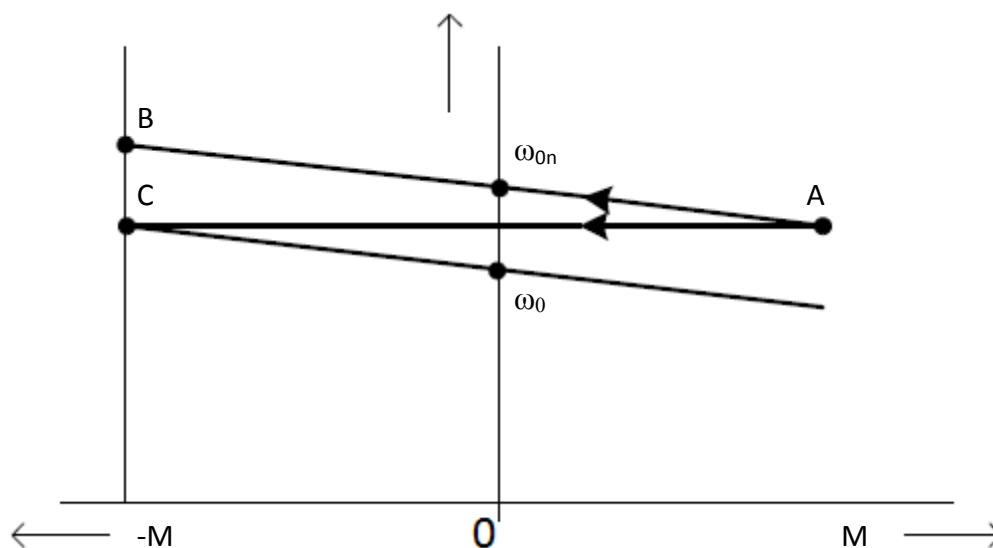
Obr. 17 Koncepce elektromobilu s elektromotory na předních kolech

3.2 Princip brzdění elektromobilu

Použité stejnosměrné elektromotory mohou plynule z provozu v režimu pohonu do generátorického režimu. V generátorickém režimu se obrátí směr momentu motoru, elektromotory tedy vyvíjí brzdný moment. Toto je možné řídit snížením napájecího napětí na hodnotu snížené rychlosti naprázdno.

Elektromotory také rekuperují část energie která se naindukuje na vinutí kotvy motoru proto je nutné aby zdroj byl schopný vést proud opačného směru. U uvažovaného čtyřkvadrantového pulzního měniče je tento přechod samovolný.

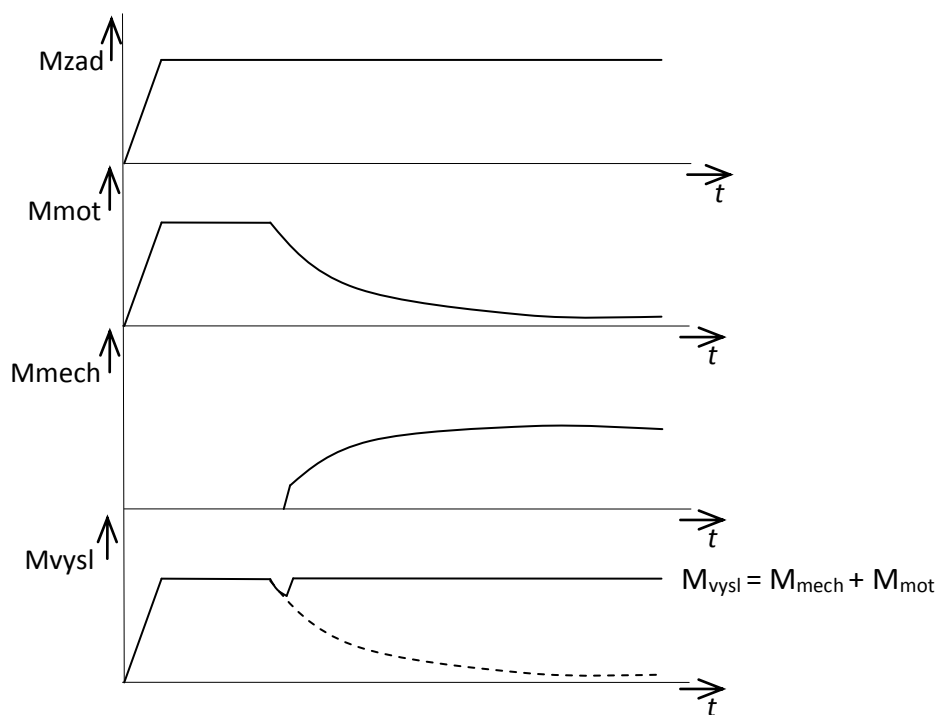
Na následujícím obrázku jsou znázorněny přechody elektromotoru z režimu pohonu (bod A) do generátorického režimu (bod B a C). Toho lze docílit buďto aktivním zvýšením otáček ω_{0n} například jízdou z kopce, nebo snížením napájecího napětí. V bodech B a C elektromotor vyvíjí záporný moment.



Obr. 18 Generátorické brzdění DC motoru s permanentními magnety[8]

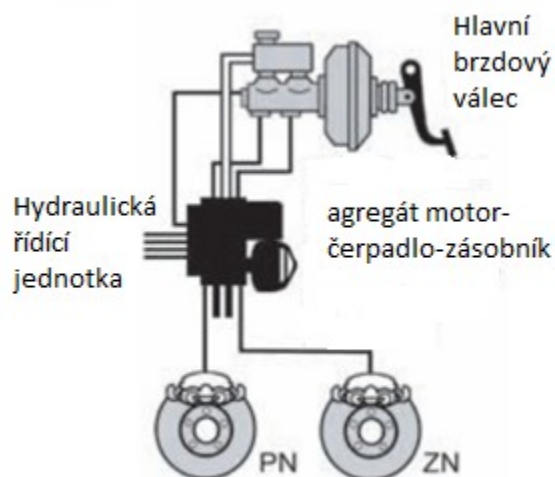
V případě, že požadovaný brzdný moment řidičem není příliš velký, je veškerý brzdný výkon zajišťován elektromotorem. V opačném případě, kdy již elektromotor nestačí pokrýt požadavek na brzdný moment tak se zapojují do funkce standardní mechanické třecí brzdy. Elektromotor i mechanické brzdy brzdí součinně. Mechanické brzdy jsou uvedeny k funkci, jakmile je řídicí jednotkou zjištěná odchylka požadovaného brzdného momentu a momentu vyvíjeného motorem větší, než určitá stanovená mez. Jelikož stejnosměrný elektromotor v generátorickém režimu vyvíjí

největší brzdňý moment ve vyšších otáčkách a s klesajícími otáčkami klesá jeho brzdňý účinek tak dobrzdňování mechanickými brzdami je otázkou zejména nižších rychlostí a prudšího brzdění.



Obr. 19 Součinnost brzdění elektromotorem a mechanickými brzdami

Pro takovouto funkci brzd se nejvíce hodí elektrohydraulický brzdový systém. U tohoto systému je zachován hydraulický systém brzd, ale brzdy při normálním provozu nejsou přímo spojeny s brzdovým pedálem. Řídící elektronika pomocí snímačů polohy monitoruje míru sešlápnutí brzdového pedálu a vypočítá potřebný brzdňý tlak na kolo. Elektromotorem poháněné hydraulické čerpadlo dodává tlak do hydraulického tlakového zásobníku který plní funkci akumulátoru tlaku z kterého je tlaková kapalina přes regulační prvky ovládaných řídících jednotkou přiváděna do brzdových třmenů jednotlivých kol. Pro případ poruchy elektrohydraulického brzdového systému celý okruh zachovává spojení mezi brzdovým pedálem a brzdami a síla je při poruše přenášena klasickým způsobem přes hydraulický válec na brzdy kol.



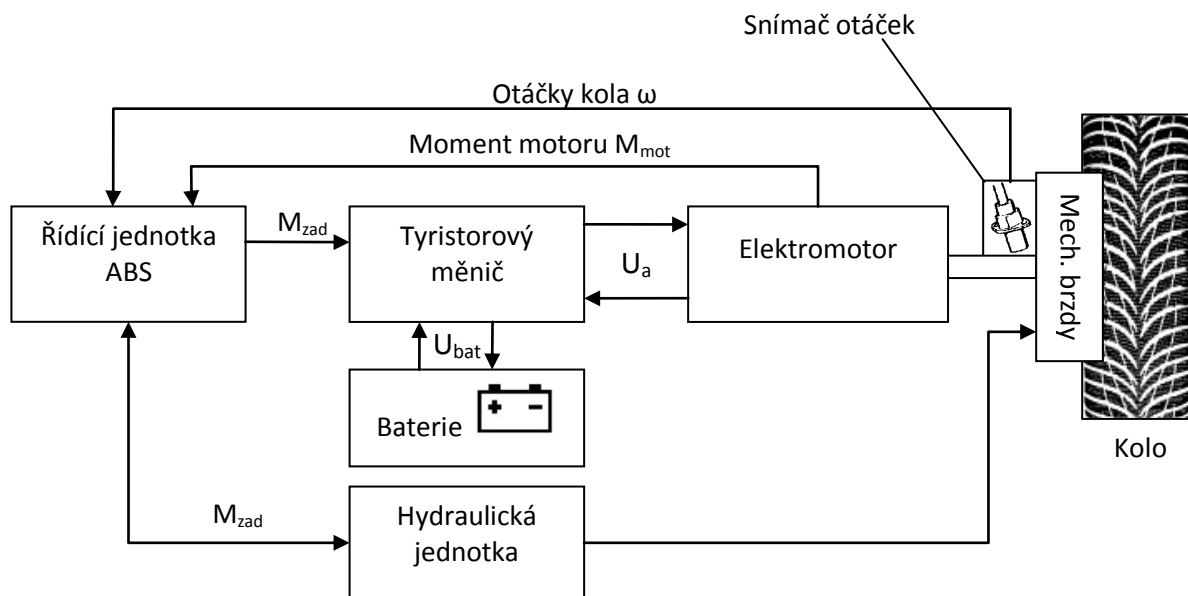
Obr. 20 Elektrohydraulický brzdový systém

Hydraulickou jednotku tvoří hydraulická řídicí jednotka s ventily pro jednotlivé okruhy brzd a agregát motor-čerpadlo-zásobník, který vytváří a udržuje hydraulický tlak. Příkazy vydává elektronická řídicí jednotka.[9]

3.3 Řešení funkce ABS

Regulací brzdného momentu elektromotoru pomocí řídicího napětí je možné plnit funkci podobnou systému ABS tak jak je známé standardních brzdových okruhů u vozidel se spalovacími motory. Princip systému ABS pro vozidla se spalovacími motory je popsán v kapitole 1. Jakmile řídicí jednotka vyhodnotí ze signálů snímačů otáček kol, že kola mají tendenci k prokluzování sníží hodnotu požadovaného brzdného momentu elektromotoru. Tato vypočítaná hodnota momentu je poté regulátorem nastavena skrze tyristorový měnič pomocí řídicího napětí na elektromotoru.

Vzhledem k tomu, že velikost momentu vyvíjeného elektromotorem je úměrná velikosti proudu tekoucího kotvou motoru, tak zpětnou vazbu řídicí jednotce o momentu elektromotoru, pro možnost řízení v uzavřené regulační smyčce a vyhodnocení bodu zapojení mechanických třecích brzd, zajišťuje čidlo proudu umístěné v elektromotoru.



Obr. 21 Blokové schéma soustavy

M_{zad} - moment požadovaný od ŘJ, U_a - řídicí napětí, U_{bat} - napětí zdroje elektromobilu

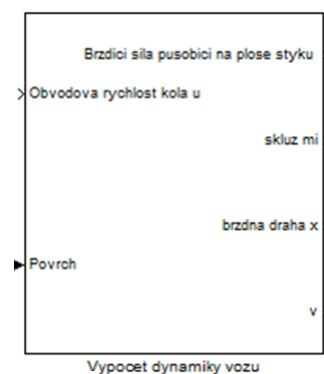
Snižování momentu trvá tak dlouho, dokud se hodnota skluzu na kolech opět nesníží. Poté se systém snaží brzdňý moment zase navyšovat do doby, než skluz opět překročí povolenou mez. Regulace skluzu je deaktivována při rychlostech menších než 2m/s.

4. *Model soustavy*

Tato kapitola se zabývá čtvrtým bodem zadání diplomové práce a to tvorbou matematického modelu soustavy v simulačním prostředí Matlab. Model simuluje chování brzdové soustavy elektromobilu složené z elektromotoru a mechanických brzd tak jak je zjednodušeně popsána výše v kapitole 3. Model umožňuje zobrazení důležitých průběhů jako je například brzdná dráha a rychlost vozu, obvodová rychlost kol hnané nápravy, řídicí napětí a proud elektromotoru a další.

4.1 *Blok dynamiky vozu*

Tento blok zajišťuje simulaci podélné dynamiky vozu při brzdění. Týká se výpočtů jízdních odporů, skluzu pneumatiky, třecí síly závislé na povrchu vozovky, rychlosti a ujeté dráhy vozidla.



Obr. 22 Blok výpočtu dynamiky vozu

Odpor proti zrychlení posuvné části

Proti zrychlení a zpomalení vozidla působí setrvačná síla.

$$O_z = m_k \cdot a$$

m_k [kg] hmotnost vozidla připadající na jedno kolo

a [m/s²] zrychlení vozidla

Odpor proti zrychlení rotačních částí je simulován v bloku „Setrvačnosti motoru a kola“. Model soustavy uvažuje simulaci pro jedno kolo. Místo celkové hmotnosti vozu je tedy použita poměrná hmotnost automobilu připadající na jedno kolo m_k .

Odpor válivý

Tento odpor vzniká vlivem deformace pneumatiky a podložky. Pokud lze vozovku považovat za tuhou je uvažována jen deformace pneumatiky.

$$O_f = G \cdot f = m_k \cdot g \cdot f$$

g [m/s²] tíhové zrychlení (pro zemi $g=9,81$ m/s²)

f [-] součinitel válivého odporu

Na součinitel válivého odporu f mají vliv především povrch vozovky a deformace pneumatiky.

Tabulka součinitelů válivého odporu podle druhu povrchu

Povrch	f	Povrch	f
Asfalt	0,01-0,02	Travnatý terén	0,081-0,0115
Beton	0,015-0,025	Hluboký písek	0,15-0,30
Dlažba	0,02-0,03	Čerstvý sníh	0,20-0,30
Polní cesta - suchá	0,04-0,15	Bahnitá půda	0,20-0,40
Polní cesta - mokrá	0,08-0,20	Náledí	0,01-0,025

Tabulka 2 Součinitel válivého odporu pro různé povrchy

Model soustavy simuluje jízdu po asfaltu a náledí, je tedy použita konstantní hodnota válivého odporu $f = 0,02$.

Odpor vzdušný

Reprezentuje odpor, který vzniká při jízdě prouděním vzduchu kolem karoserie. Část vzduchu proudí kolem horní karoserie a část se musí protlačit spodem.

$$O_v = c_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2$$

v_r [m/s] výsledná náporová rychlost proudění vzduchu

kolem vozidla. Při bezvětrí je rovna rychlosti vozu

S_x [m²] průmět čelní plochy vozu

ρ [kg/m³] měrná hmotnost vzduchu $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

c_x [-] součinitel vzdušného odporu. Závisí především na tvaru vozidla.



Obr. 23 Průmět čelní plochy vozu

Hodnoty c_x a S_x pro některé druhy vozidel jsou uvedeny v tabulce

Druh vozidla	c_x [-]	S_x [m ²]
Osobní automobil	0,3 – 0,4	1,6 – 2,0
Sportovní automobil	0,3 – 0,35	1,3 – 1,6
Nákladní vozy	0,8 – 1,0	4 - 7
Autobusy	0,5 – 0,7	5 - 7

Tabulka 3 Hodnoty součinitel odporu vzduchu a čelní plochy

Skluz

Skluz popisuje jev kdy při brzdění kola se liší středová rychlost kola v (shodná s rychlostí vozu) a obvodová rychlost kola u .

Skluz kola při brzdění je definován takto:

$$\lambda = \frac{v-u}{v} = 1 - \frac{u}{v}$$

v [m/s] středová rychlost kola shodná s rychlostí vozu

u [m/s] obvodová rychlost kola

Na skluzu závisí hlavně součinitel tření mezi podložkou (vozovkou) a kolem μ .

V simulaci je výpočet hodnoty skluzu realizována blokem Matlab Function, pro který je napsán následující kód:

```
function [vystup] = skluzfcn(vstup)
```

```
v=vstup(1);
```

```
u=vstup(2);
```

```
if v<=0||u>=v
```

```
    lambda=0;
```

```
elseif u<=0
```

```
    lambda = 1;
```

```
else
```

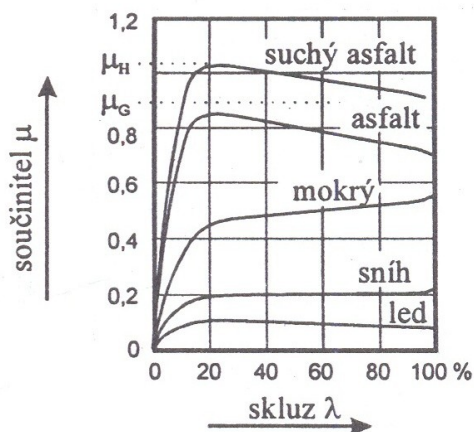
```
    lambda=((v-u)/v);
```

```
end;
```

```
vystup(1)=lambda;
```

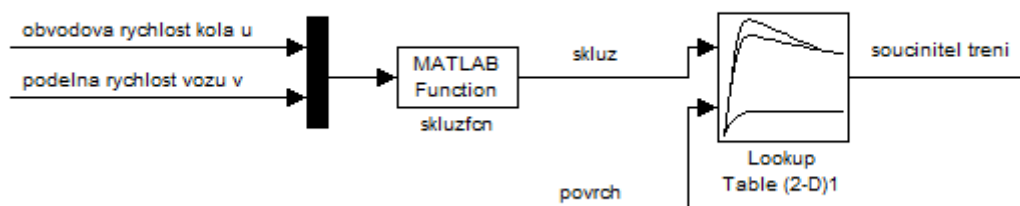
Součinitel tření

Závislost součinitele tření v závislosti na skluzu pro různé povrchy vozovky je uvedena v následujícím grafu. Nabývá hodnot od 0 do 1.



Graf 4 Součinitel tření v závislosti na skluzu pro různé povrchy[10]

V simulaci je závislost součinitele tření na skluzu realizována blokem Lookup Table. Tento přiřadí podle zadaných dat příslušnému skluzu a povrchu na vstupu hodnotu součinitele tření na výstup. Hodnota „povrch“ může nabývat hodnot 1-3 podle druhu povrchu který chceme simulovat.



Obr. 24 Vypocet soucinitele treni ze skluzu

Brzdící síla působící na ploše styku

Pro brzdnou sílu platí

$$F_X = F_g \cdot \mu$$

$$F_X = m_k \cdot g \cdot \mu$$

F_g [N] tíhová síla kola, μ [-] součinitel tření mezi vozovkou a kolem

Rychlost, dráha

Z pohybové rovnice popisující pohyb vozidla v podélném směru dostaneme zrychlení a poté integrací rychlost a dráhu.

$$m \cdot a = -\sum F$$

$$a = \frac{-\sum F}{m}$$

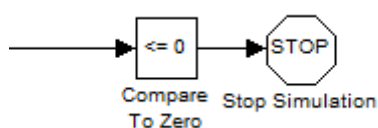
$$v = \int a(t) dt$$

$$s = \int v(t) dt$$

$\sum F$ [N] součet všech sil působících proti pohybu vozu.

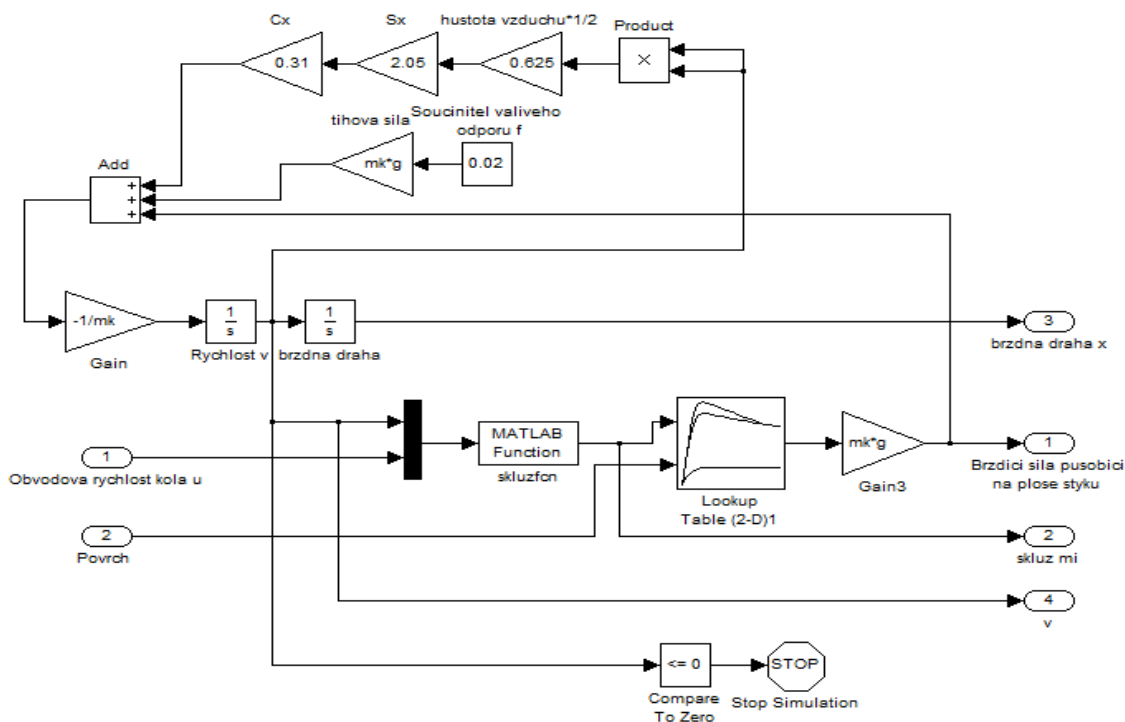
Zastavení simulace

Simulace je zastavena ve chvíli kdy se rychlost vozu rovná nule. $v = 0$.



Obr. 25 Zastavení simulace

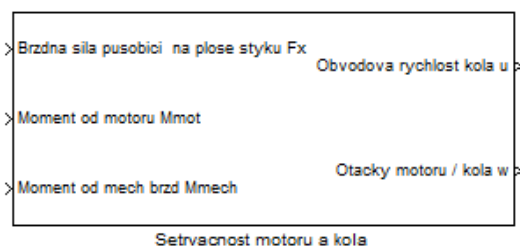
Kompletní vnitřní struktura bloku pro výpočet podélné dynamiky vozu



Obr. 26 Struktura zapojení bloku pro výpočet podélné dynamiky vozu

4.2 Blok setrvačnosti motoru a kola

V tomto bloku jsou simulovány rotační části vozu. Setrvačnost kotvy motoru a vlastního kola. Na základě vstupujícího brzdného momentu od motoru a brzdného momentu od mechanických brzd jsou vypočítány otáčky motoru a kola a obvodová rychlost kola.



Obr. 27 Blok setrvačnosti motoru a kola

Výpočet vychází z pohybové rovnice rotačního pohybu otáčení kola

$$J\varepsilon = r \cdot Fx - \sum M$$

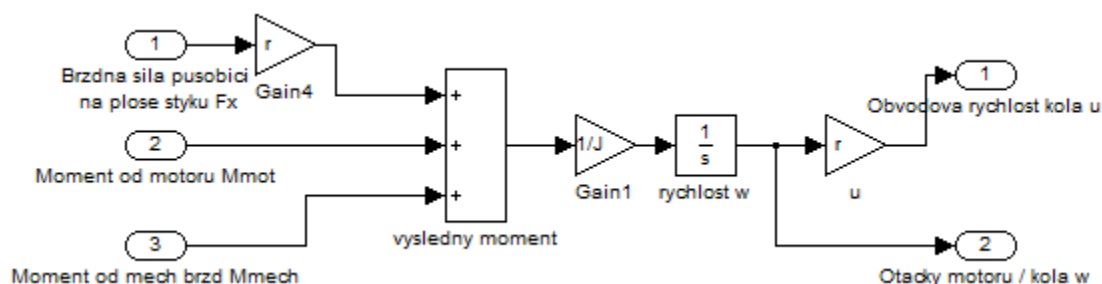
J [kg.m²] moment setrvačnosti rotačních částí

ε [rad.s⁻²] úhlové zrychlení

r [m] poloměr kola

$\sum M$ [Nm] suma brzdných momentů (momentu od motoru M_{mot} a momentu od mechanických brzd M_{meh})

Vnitřní struktura bloku setrvačnosti motoru a kola

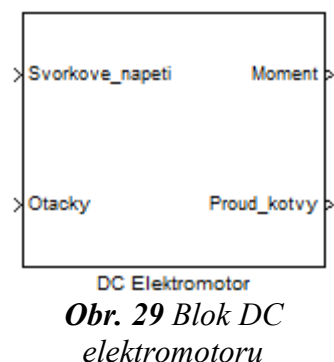


Obr. 28 Vnitřní struktura bloku setrvačnosti motoru a kola

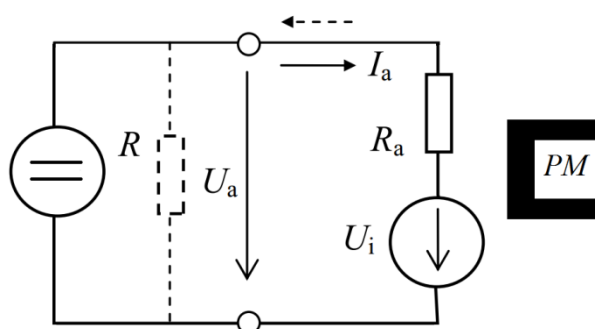
V parametrech bloku spojitě integrace se jako počáteční podmínka zadává počáteční neboli výchozí rychlost pro celou simulaci brzdění vozu.

4.3 Blok stejnosměrného elektromotoru

V této části simulace je namodelován stejnosměrný elektromotor s cizím buzením permanentními magnety. Blok na základě vstupního svorkového napětí vypočítá moment vyvíjený elektromotorem. Je zde i výstup proudového čidla, které měří proud kotvou motoru pro následné využití této hodnoty pro výpočty v dalších blocích.



Pro potřeby technické praxe je dostatečné použití následujícího modelu elektromotoru, který vychází z určitých zjednodušení – zanedbání rozptylového magnetického toku budícího vinutí, vzájemného transformačního působení jednotlivých vinutí, vlivu vířivých proudů v magnetickém obvodu, úbytku napětí v kartáčích a podobně. Je-li motor řízený změnou napětí kotvy při konstantním buzení permanentními magnety, lze ho popsat následujícím schématem a rovnicemi.[10]



Obr. 30 Schéma stejnosměrného motoru s permanentními magnety

$$u_a(t) = c\phi\omega(t) + R_m I_a(t) + L_m \frac{di_a(t)}{dt}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_M - M_Z$$

$$M_M = c \cdot \phi \cdot i_a$$

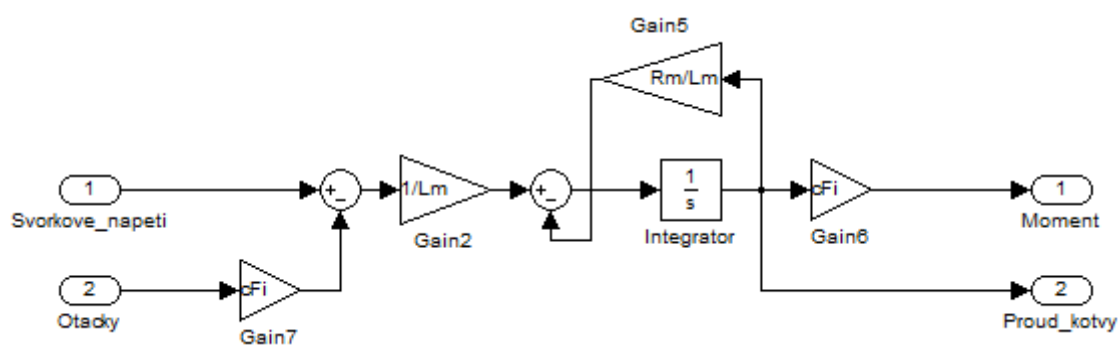
$$u_i(t) = c \cdot \phi \cdot \omega$$

Vzhledem k tomu že elektromotor v modelu soustavy funguje převážně v generátorickém režimu tedy jako stejnosměrný generátor s cizím buzením je zde vyjádřen i vztah pro svorkové napětí zatíženého generátoru.

$$u_a(t) = u_i(t) - R_a \cdot i_a(t) = u_i(t) - \Delta u_a$$

$i_a(t)$ [A]	proud kotvy motoru
$u_a(t)$ [V]	napětí kotvy(svorkové napětí) motoru
$u_i(t)$ [V]	indukované napětí na kotvě motoru
ϕ [Wb]	magnetický tok
c [-]	konstrukční konstanta motoru
R_m [Ω]	celkový odpor všech vinutí v obvodu kotvy motoru
L_m [H]	celková indukčnost všech vinutí v obvodu kotvy motoru
Δu_a [V]	celkový úbytek napětí na obvodu kotvy
M_M [Nm]	moment motoru
M_Z [Nm]	moment zátěže

Vnitřní struktura bloku stejnosměrného elektromotoru



Obr. 31 Vnitřní struktura bloku pro simulaci stejnosměrného elektromotoru

4.4 Blok řízení momentu elektromotoru

Tento blok v simulaci zajišťuje řízení výstupního momentu elektromotoru. Toto se děje pomocí PI regulátoru a zpětné vazby od proudu kotvy elektromotoru. PI regulátor nastavuje řídicí (svorkové) napětí elektromotoru na takovou hodnotu, aby výstupní hodnota momentu elektromotoru odpovídala co možná nejvíce požadované hodnotě momentu, kterou stanovuje řídicí jednotka simulovaná v bloku „algorithmus ABS“.



Obr. 32 blok řízení momentu mot.

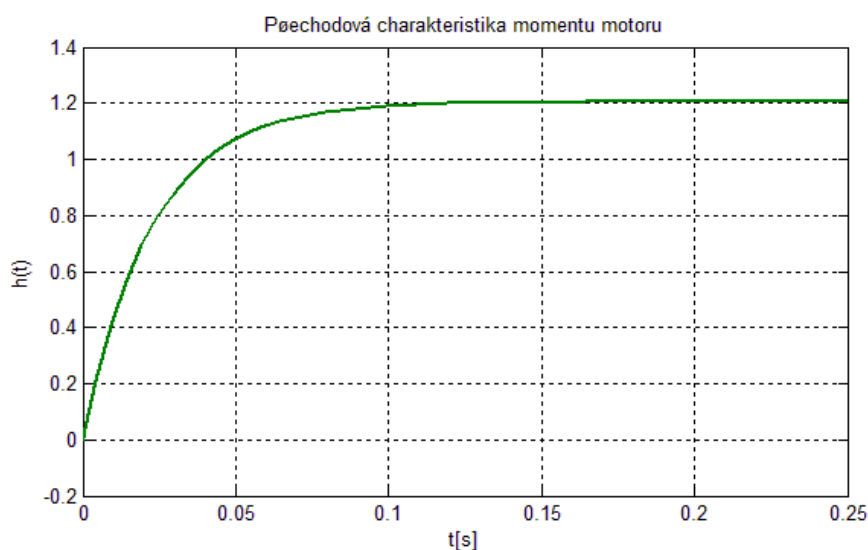
Moment motoru M_{mot} je v bloku řízení momentu vypočítán z proudu kotvy i_a podle vztahu

$$M_M = c \cdot \phi \cdot i_a$$

Identifikace soustavy

Vytvoříme přechodovou charakteristiku motoru jako odezvu na jednotkový vstupní skok. Z přechodové charakteristiky motoru se dá určit, že se jedná o proporcionální soustavu se setrvačností 1. řádu bez dopravního zpoždění, která je popsána přenosem:

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \quad K \dots \text{zesílení soustavy, } T_1 \dots \text{časová konstanta}$$



Obr. 33 Přechodová charakteristika momentu motoru

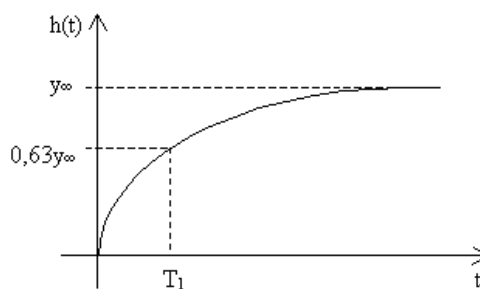
Po aproximaci přechodové charakteristiky proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu určíme časové konstanty a hodnotu zesílení jako

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)}$$

$y(\infty)$... ustálená hodnota výstupní veličiny

$u(\infty)$... ustálená hodnota vstupní veličiny

T_1 určíme z hodnoty $0,63 y(\infty)$.



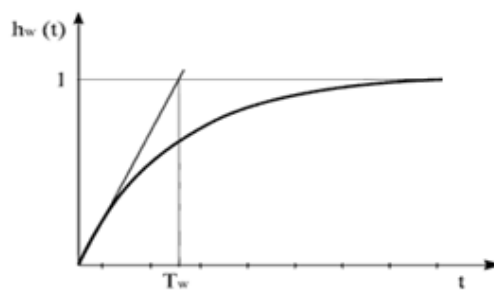
Obr. 34 Odečtení časových konstant z přechodové charakteristiky

Výpočet stavitelných parametrů regulátoru

Optimální hodnoty stavitelných parametrů jsou vypočteny pomocí **metody požadovaného modelu** (inverze dynamiky). Na základě přenosu přiřadíme regulátor typu PI a určíme vztahy pro výpočet stavitelných parametrů. Viz. [12] tabulka 10 řádek 4.

$$T_I^* = T_1$$

$$k_p^* = \frac{2T_I^*}{k_1 \cdot 2T_w}$$



Obr. 35 Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky regulované soustavy a volba konstanty T_w

Časová konstanta T_w musí být zvolena s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotou zesílení regulátoru $k_{p \max}$.

Zapojení regulátoru

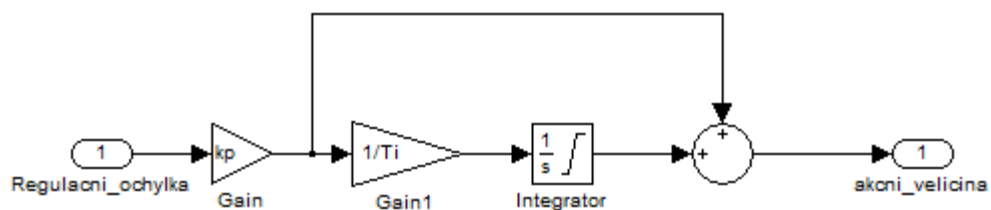
Zapojení regulátoru je uspořádáno podle rovnice přenosu PI regulátoru

$$G_R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$$

G_R ... přenos regulátoru

k_p ... zesílení regulátoru

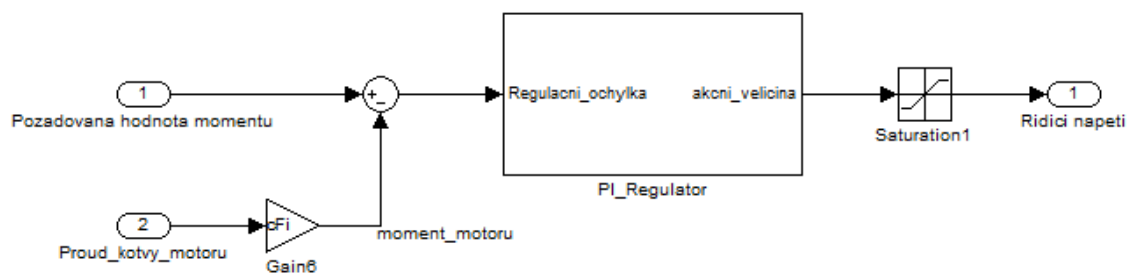
T_I ... integrační časová konstanta regulátoru



Obr. 36 Vnitřní struktura zapojení PI regulátoru

Konkrétní hodnoty parametrů elektromotoru, odečtených časových konstant a stavitelných parametrů regulátoru jsou prezentovány ve výsledcích práce.

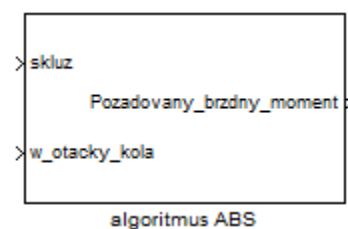
Vnitřní struktura bloku řízení momentu elektromotoru



Obr. 37 Struktura bloku řízení momentu elektromotoru

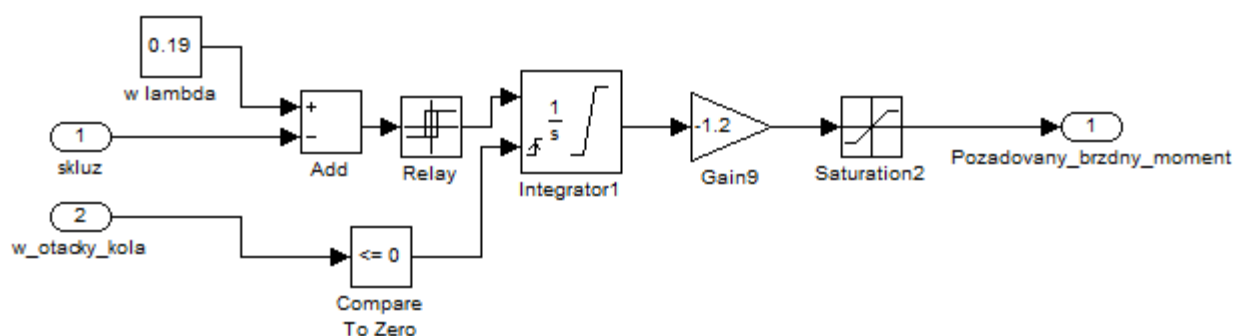
4.5 Blok algoritmus ABS

V tomto bloku probíhá samotná regulace skluzu kol. Na základě vypočtené hodnoty skluzu v bloku „výpočet dynamiky vozu“ je zvyšován nebo naopak snižován požadavek na moment elektromotoru. Regulace se snaží řídit hodnotu skluzu kolem ideální hodnoty 0,2. Zároveň však hodnota požadovaného brzdného momentu nikdy nepřekročí maximální hodnotu momentu M_{\max} zadanou na začátku simulace která modeluje požadavek řidiče a míru sešlápnutí brzdového pedálu.



Obr. 38 Blok algoritmus ABS

Vnitřní struktura bloku algoritmu ABS



Obr. 39 Vnitřní struktura zapojení bloku algoritmus ABS

Blok reléového spínače „relay“ simuluje přepínání mezi hodnotou pro snižování a zvyšování brzdného momentu motoru na základě odchylky skluzu od ideální hodnoty. Je zde určité pásmo necitlivosti(hystereze) aby nedocházelo ke zmatečnému spínání. Blok spojitě integrace modeluje postupný nárůst momentu.

Blok omezení „saturation“ je pro omezení brzdného momentu aby nepřesáhnul maximální požadovanou hodnotu M_{\max} .

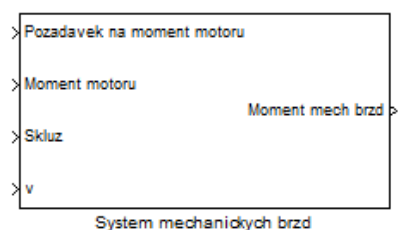
Pro okamžitou reakci v případě zablokování kol, je zde reset integrálu při hodnotě otáček kola $\omega = 0$. Toto opatření je účinné zejména při přechodu mezi dvěma povrchy vozovky s rozdílnými součiniteli tření, kdy je potřeba velmi rychle snížit brzdný moment.

4.6 Blok mechanických brzd

Tento blok doplňuje soustavu brzdění elektromotorem o účinek mechanických brzd v okamžiku, kdy již elektromotor není schopen podávat potřebný brzdňý moment. Toto se stává

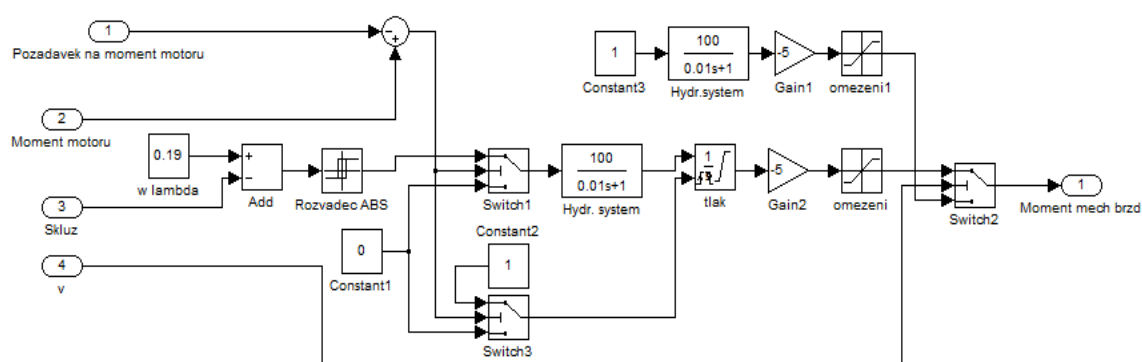
zejména při nižších otáčkách a při prudším brzdění. Je v něm tedy aplikován algoritmus pro určení okamžiku zapojení mechanických brzd. Má také vlastní algoritmus pro regulaci skluzu pro brzdění mech. brzdami. Tento blok také řeší dobrzdění vozidla do nulové rychlosti. Při rychlostech menších než 2m/s vypíná regulaci skluzu (ABS) a brzdí konstantním momentem. Na výstupu tohoto bloku je moment, který brzdy vyvolají na brzděném kole.

Určení okamžiku zapojení mechanických brzd spočívá v porovnávání požadované hodnoty brzdňého momentu a aktuálního momentu dodávaného elektromotorem, jakmile je mezi těmito hodnotami záporná odchylka větší než určitá stanovená mez, zapojí se mechanické brzdy.



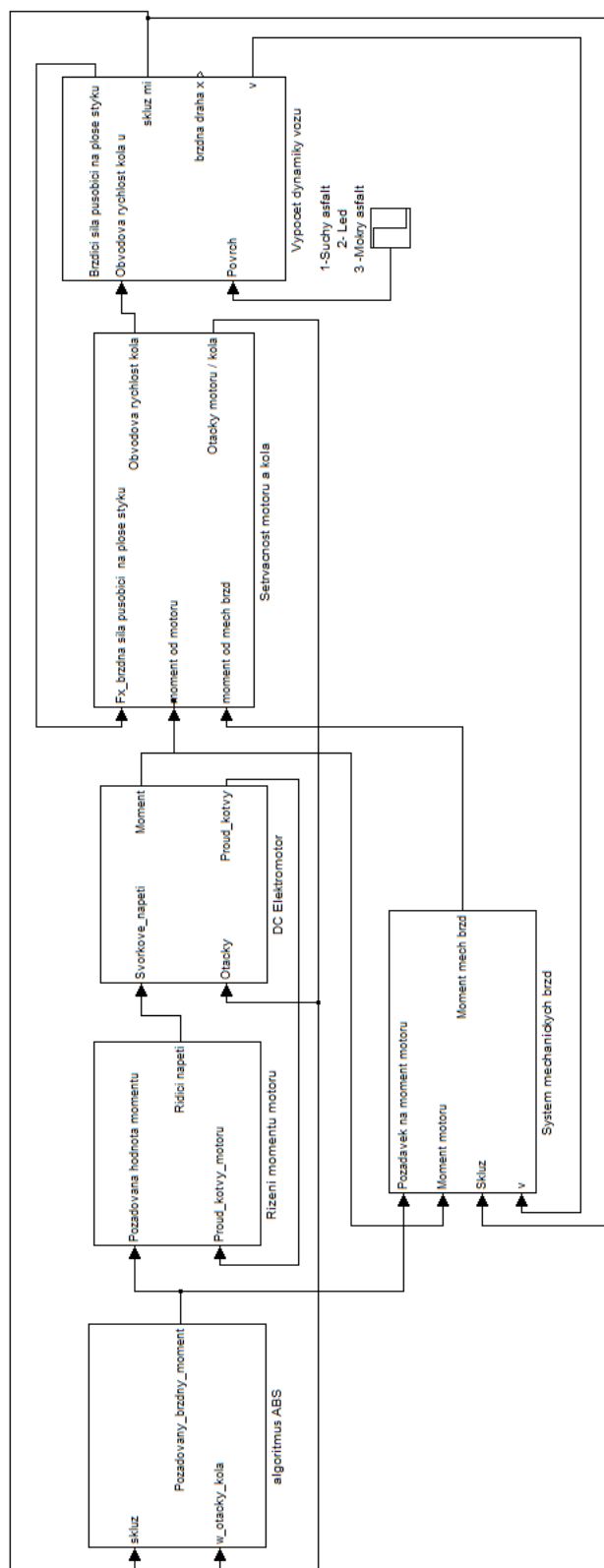
Obr. 40 Blok systému mech. brzd

Vnitřní struktura bloku mechanických brzd



Dynamiku hydraulického systému je modelována setrvačným členem a integrační člen modeluje změnu tlaku v hydraulickém systému.[10]

4.7 Celkové blokové simulační schéma



Obr. 41 Celkové simulační schéma

5 Výsledky simulací

5.1 Parametry modelu

Simulace byly prováděny pro tyto konkrétní parametry modelu:

$m_k = 250kg$	hmotnost vozu připadající na jedno kolo
$r = 0,25m$	poloměr kola
$g = 9,81kg \cdot m \cdot s^{-2}$	gravitační zrychlení
$f = 0,02$	součinitel válivého odporu
$C_x = 0,31$	součinitel vzdušného odporu vozu
$S_x = 2,05m^2$	průmět čelní plochy vozu
$\rho_v = 1,25kg \cdot m^3$	hustota vzduchu
$J = 1kg \cdot m^2$	setrvačný moment motoru a všech rotačních částí spojených s hřídelí motoru
$c = 0,31$	konstrukční konstanta motoru
$\phi = 4.48$	magnetický tok permanentních magnetů
$Lm = 0,028H$	indukčnost vinutí kotvy motoru
$Rm = 1,24\Omega$	odpor vinutí kotvy motoru
$Mz = 0,0045Nm$	moment vyvolaný pasivními odpory motory

Stavitelné parametry PI regulátoru

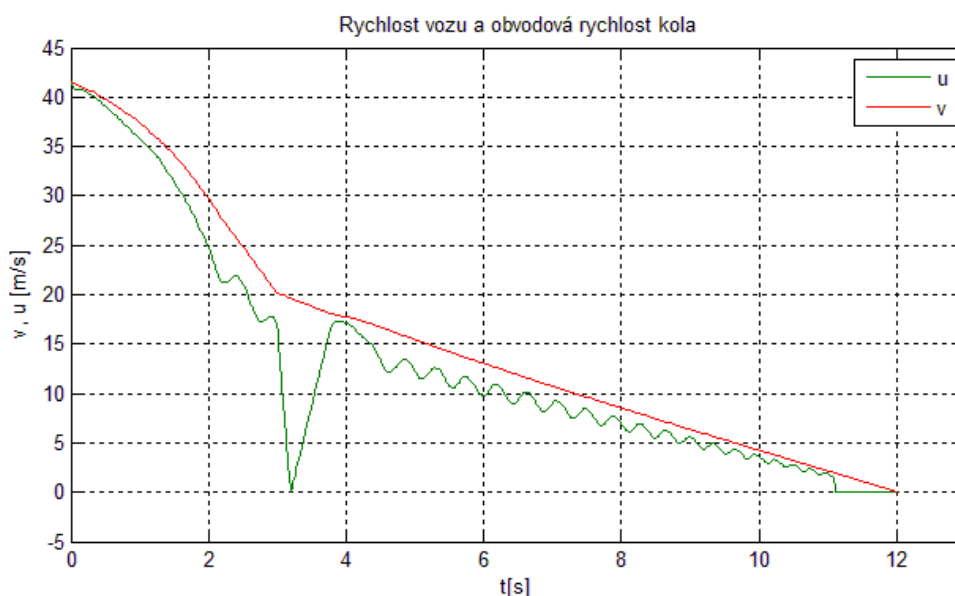
$k_p^* = 0,83$	zesílení regulátoru
$T_I^* = 0,03$	integrační časová konstanta regulátoru

V diplomové práci jsou prezentovány hlavně výsledky simulací brzdění na kluzkém povrchu nebo prudké brzdění, při kterých je nejvíce patrná funkce ABS systému a mají tedy největší vypovídací hodnotu. Jsou uvedeny výsledky pro 2 případy, a to brzdění na mokrém asfaltu s přechodem na sníh a brzdění na sněhu bez přechodu.

5.2 Brzdění na mokrém asfaltu s přechodem na sníh v čase 3s

Při této simulaci elektromobil brzdí na mokrém asfaltu a v čase $t = 3s$ najede na vozovku pokrytou sněhem. Brzdí prudce z počáteční rychlosti $v_0 = 41,6m \cdot s^{-1}$, maximální brzdňý moment nastavený řidičem je $M_{max} = 1000Nm$.

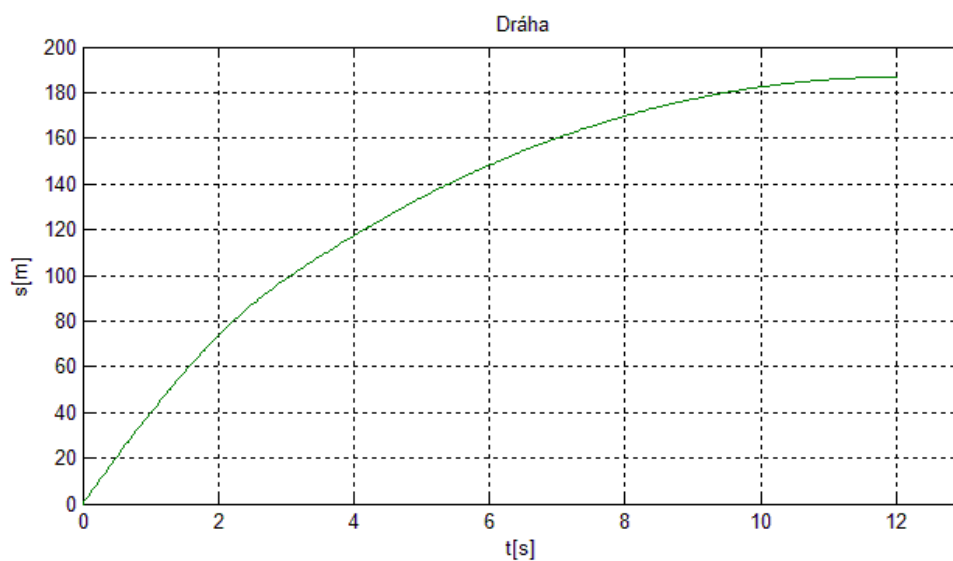
Rychlost vozu a obvodová rychlost kola



Graf 5 Rychlost vozu a obvodová rychlost kola

Z tohoto průběhu je dobře patrná tendence kola k blokování a jejímu zamezení díky ABS. V čase $t = 3s$ kdy automobil najede na led je vidět větší rozdíl rychlostí kola a auta. Od této chvíle taky rychlost vozu klesá s menší strmostí. Při rychlosti vozu blížící se nule je vidět úplné vyřazení systému ABS z funkce a dojde k zablokování kola. Toto je opatření pro bezpečné zastavení vozu.

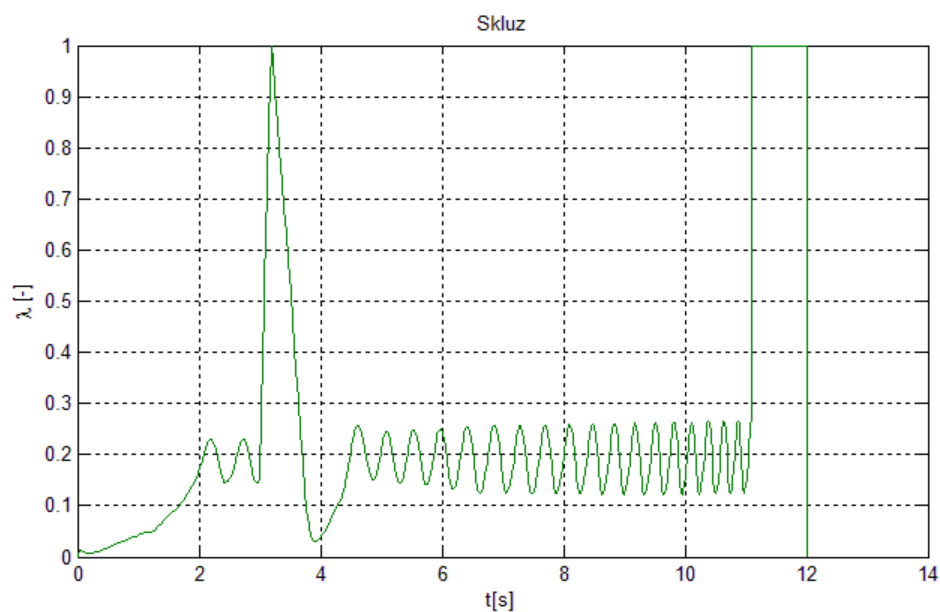
Dráha



Graf 6 Dráha

Z grafu závislosti dráhy v čase je patrné že automobil na dané vozovce úplně zastaví po ujetí dráhy 187m v čase 12s.

Skluz



Graf 7 Skluz

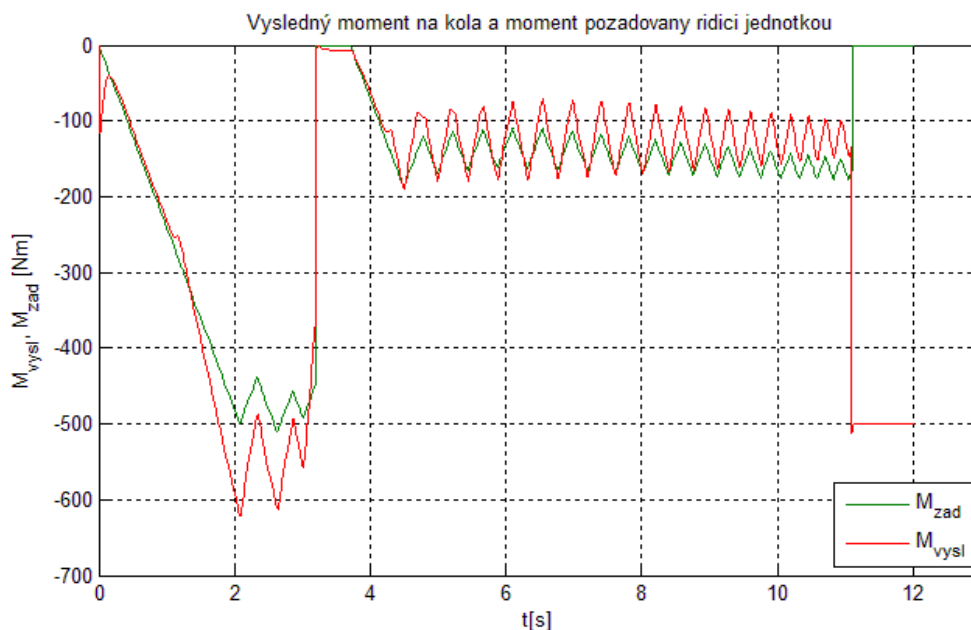
Z průběhu hodnoty skluzu je vidět že regulace skluzu funguje správně, systém ABS se snaží udržovat hodnotu v okolí ideální hodnoty skluzu 0,2. Ve chvíli přejezdu

Moment od elektromotoru a moment od mechanických brzd



58

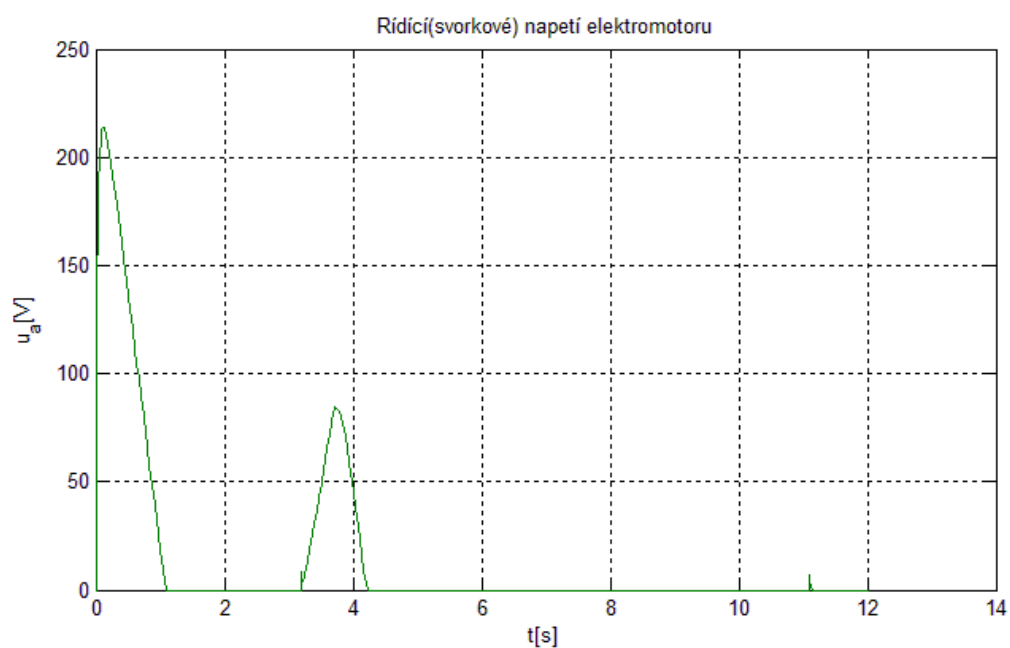
Porovnání průběhů požadovaného momentu od ŘJ a výsledného momentu na kole



Graf 9 Požadovaný moment od ŘJ a výsledný moment na kole

Výsledný brzdný moment na kole vznikne součtem momentu od mechanických brzd a elektromotoru. Je vidět, že výsledný moment se snaží kopírovat požadovanou hodnotu brzdného momentu vypočítanou řídicí jednotkou elektromotoru. Kopírování této hodnoty je předpoklad pro účinné brzdění a funkci ABS a důkaz správné součinnosti mechanického a rekuperačního brzdění elektromobilu.

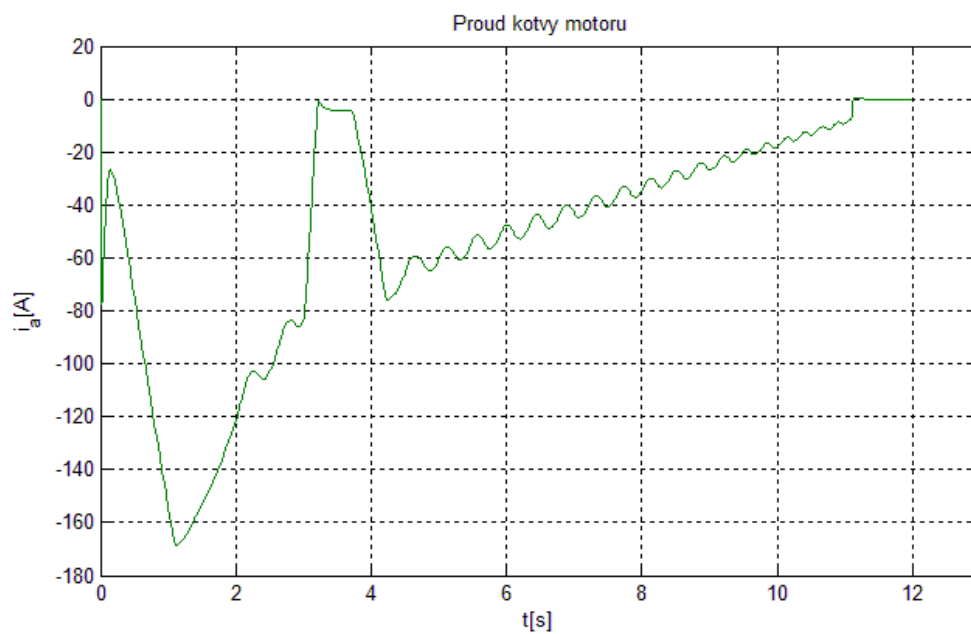
Řídicí napětí elektromotoru



Graf 10 Řídicí napětí elektromotoru

Na grafu je zobrazeno řídicí (svorkové) napětí elektromotoru u_a generované blokem „regulace momentu motoru“. Se snižováním řídicího napětí až na nulovou hodnotu se zvyšuje jeho brzdný moment a naopak.

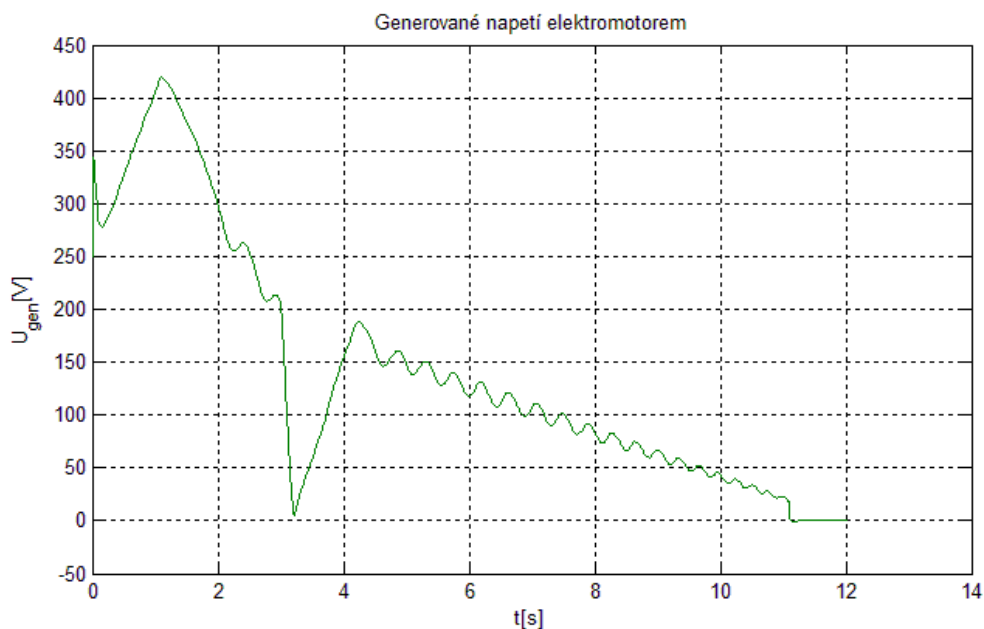
Proud kotvou motoru



Graf 11 Proud kotvou motoru

Proud kotvou motoru i_a je přímo závislý na momentu motoru. V generátorickém režimu teče kotvou záporný proud.

Napětí generované elektromotorem



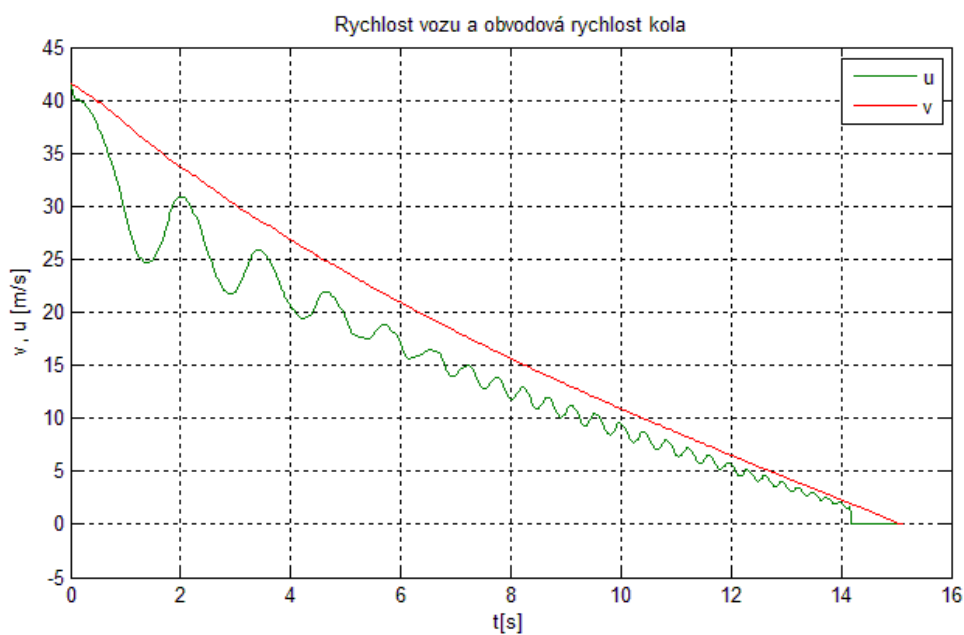
Graf 12 Napětí generované elektromotorem

Graf zobrazuje průběh napětí, které elektromotor vytváří při brzdění v generátorickém režimu a je schopný jej poskytnout k dalšímu zpracování.

5.3 Brzdění na sněhu

Následují výsledky simulace, při které auto brzdí do nuly na vozovce pokryté sněhem. Auto opět brzdí z počáteční rychlosti přibližně 42m/s a s maximální možnou přenesitelnou silou na daném povrchu (sněh).

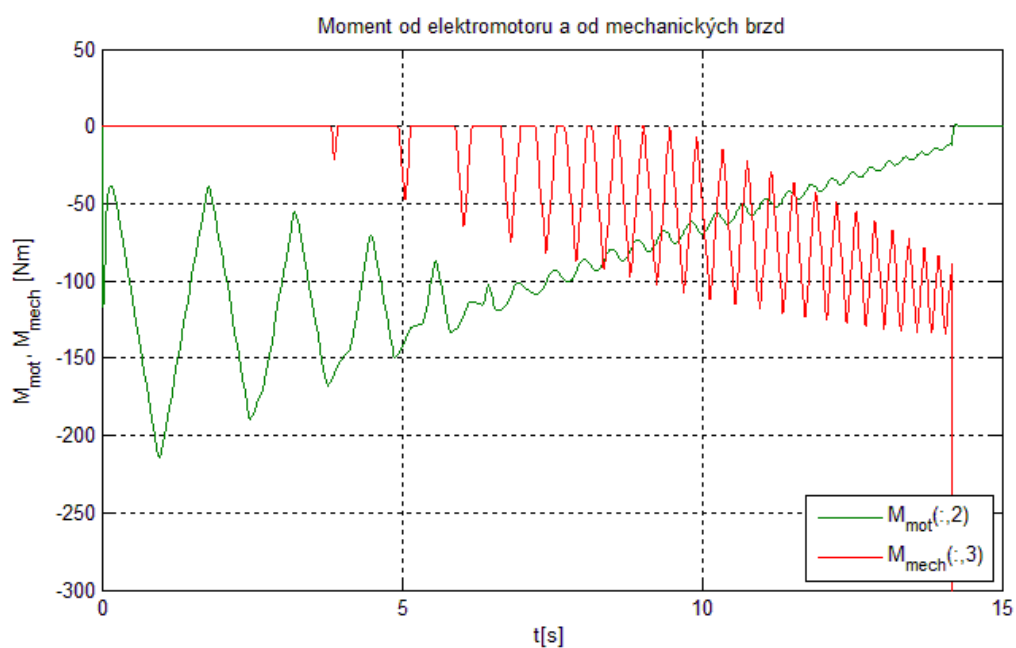
Rychlost vozu a obvodová rychlost auta



Graf 13 Rychlost vozu a obvodová rychlost kol

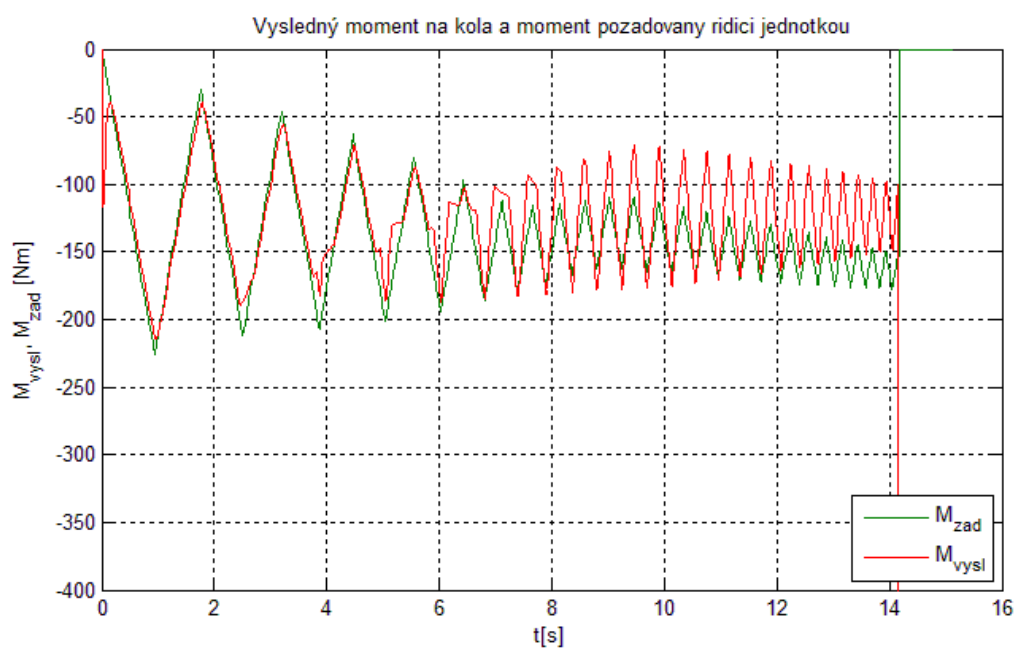
Při těchto průbězích rychlostí kol a podélné rychlosti vozu auto zastaví na dráze 275m.

Moment od elektromotoru a moment od mechanických brzd



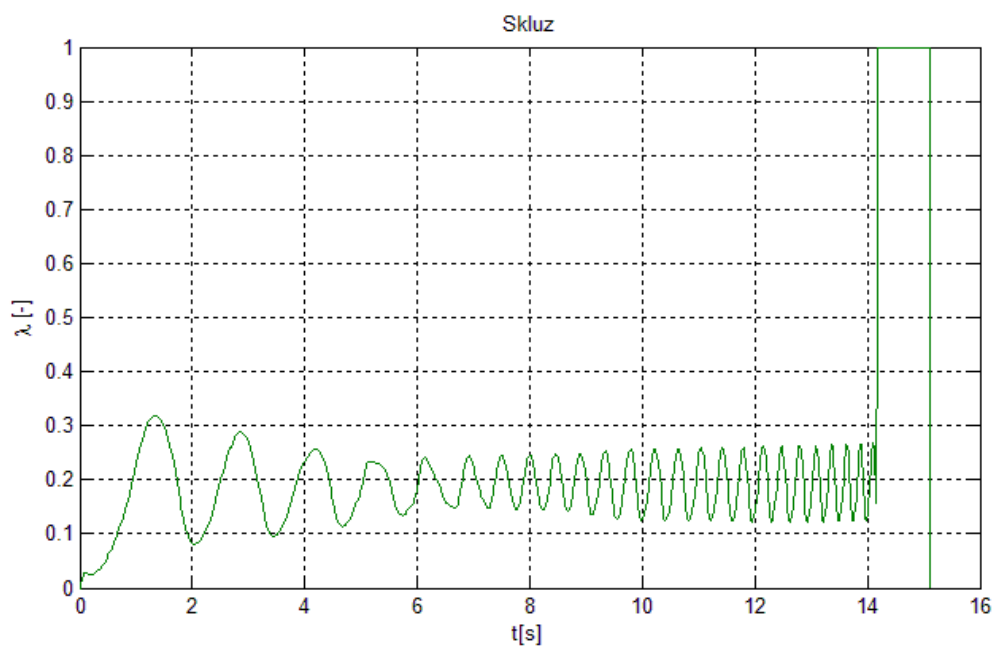
Graf 14 Porovnání momentu od elektromotoru a mechanických brzd

Porovnání průběhů požadovaného momentu od ŘJ a výsledného momentu na kole



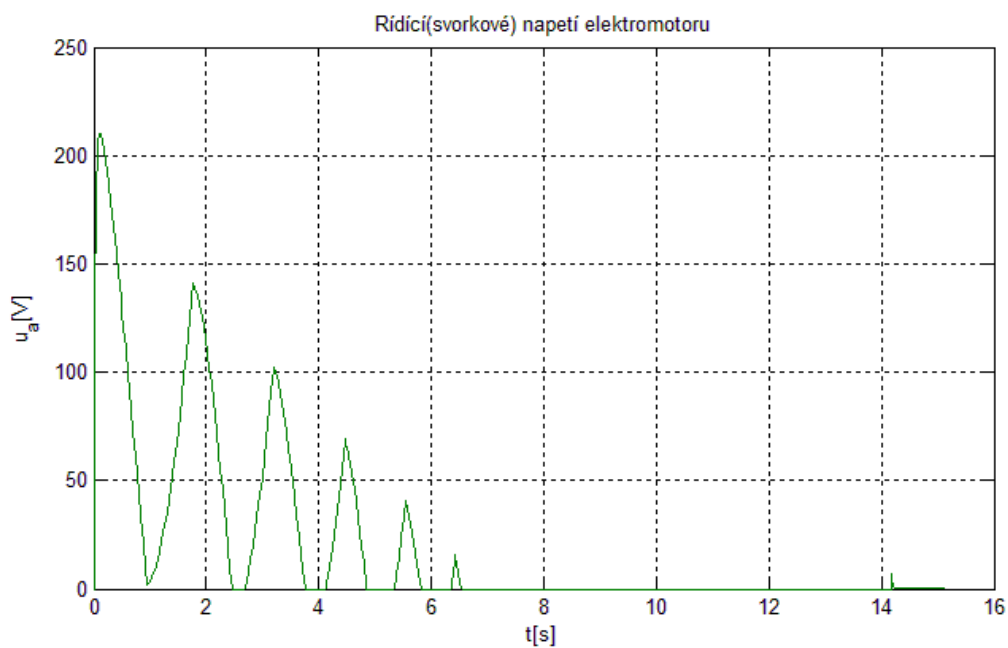
Graf 15 Požadovaný moment od ŘJ a výsledný moment na kole

Skluz



Graf 16 Skluz

Řídicí napětí elektromotoru



Graf 17 Řídicí napětí elektromotoru

V tomto grafu je vidět, že při brzdění na sněhu je ve vyšších otáčkách potřeba mnohem více akčních zásahů řídicího napětí než při předchozí simulaci kdy jelo auto zpočátku na asfaltu.

Závěr

V první kapitole diplomové práce byla popsána funkce protiblokovacího systému ABS u vozidel se spalovacími motory a základní fyzikální principy, z kterých systém vychází a jejichž znalost je důležitá pro pochopení funkce a podstaty celé problematiky. Byly zde popsány především základní prvky systému, principy činnosti pomocí názorných principiálních a blokových schémat, průběh typického regulačního cyklu a uvedeny nejčastější typy konstrukcí systému ABS. Část textu první kapitoly se také věnuje vlastnostem jednotlivých modelových řad ABS jednotek a jejich vývoji v čase. Teoretické poznatky z této kapitoly jsem využil pro vypracování dalších částí bakalářské práce.

Další kapitolou byl návrh možností řešení systému ABS u vozidel s elektrickým pohonem. Je zde popsána především problematika a základní myšlenka brzdění elektromotorem a rekuperačního brzdění obecně. Dále se kapitola zabývá součinnostmi mechanických brzd s elektromotorem a to především z bezpečnostního hlediska a hlediska funkce ABS.

Třetí částí diplomové práce byla analýza vybraného řešení. Byl zde tedy detailněji popsán navrhnutý systém brzdění elektromobilu a principiální popis možného řešení brzdové soustavy se systémem ABS. Část textu je věnovaná zvolené koncepci elektromobilu, použitým elektromotorům, popisu jejich funkce brzdění v generátorickém režimu a v neposlední řadě principem řešení funkce ABS. Z této analýzy přímo vychází další kapitola diplomové práce věnující se vytvoření simulačního modelu pro popsání řešení.

Poslední kapitola se věnovala čtvrtému bodu zadání diplomové práce týkající se vytvoření modelu navrhnuté soustavy a řízení elektromotoru. Je zde tedy popsán matematický model vytvořený v simulačním programu Matlab a prezentovány výsledky těchto simulací. Popis modelu uvádí především matematické vztahy a rovnice použité při tvorbě simulačního modelu. Jsou zde také uvedeny schémata jednotlivých funkčních celků a celkové blokové simulační schéma. Principiálně celý model simuluje soustavu, která byla popsána v kapitole 3. Výsledky simulací byly prezentovány ve formě grafů zobrazujících klíčové veličiny při brzdění elektromobilu.

Hlavní přínos této diplomové práce vidím ve vytvoření funkčního matematického modelu soustavy. Výsledky simulací dokazují, že systém ABS pro elektromobil navrhnutý v této diplomové práci dokáže auto bezpečně zastavit na

jakémkoli povrchu a teoreticky by takovýto systém nebo jemu podobný mohl prakticky fungovat v reálném automobilu. Vytvořený matematický model by bylo možné dále rozšířit například o protiprokluzovou regulaci při rozjezdu vozu ASR, detailnější popis a simulaci jednotlivých prvků systému, výpočet energetické bilance rekuperačního brzdění atp.

Literatura

- [1] Vlk, František. *Dynamika motorový vozidel*. 2.vyd. Brno 2005. ISBN 80-239-0024-2
- [2] Bosch. *Automotive Handbook*. 7. vyd. Německo 2007. ISBN 978-0-8376-1540-0
- [3] Vlk, František. *Asistenční a informační systémy*. 1.vyd. Brno 2006. ISBN 80-239-6462-3
- [4] 25th Bosch ABS anniversary. Dostupné z WWW:
<http://www.bosch.com/assets/en/company/innovation/theme03.htm>
- [5] Wikipedie. *ABS*. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/ABS>
- [6] Delichristov, D. J., *Simulace a robustní řízení antiblokovacího systému ABS*,
Disertační práce. VŠB - Technická Univerzita Ostrava 2010
- [7] M. Ehsani, Y. Gao, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, 2.vyd. Texas 2010. ISBN 978-1-4200-5398-2
- [8] *Stejnoseměrné stroje(motory)*. Studijní materiály. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava Dostupné z WWW:
http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/EP%20PEZ+USP/Studijni_opory/Motory_DC.pdf
- [9] Soudní inženýrství: časopis pro soudní znalectví v technických a ekonomických oborech.Č.3/2005 Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISSN 1211 – 443X.
- [10] Noskiewicz, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex a.s. 1999. ISBN 80 7225-030-2
- [11] *Jízdní odpory*. Studijní materiály. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z WWW:
http://homen.vsb.cz/~vac174/vyuka/EP%20EEN/Studijni_opory/Jizdni_odpory_vozidla.pdf
- [12] *Metoda požadovaného modelu (inverze dynamiky)*. Studijní materiály. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z WWW:
http://www.352.vsb.cz/uc_texty/synteza/text0304.htm#tab10

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce
prof. Ing. Petru Chlebišovi, CSc za odborné vedení a rady poskytnuté v průběhu řešení
této práce.

Ostrava, 21.5.2012

Bc. Vojtěch Roh